



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA LA VISUALIZACIÓN DE FLUJOS OSCILATORIOS

Proyecto fin de carrera

Autor: Eduardo Cañada Santurino

Director: Wilfried Coenen

Leganés, Julio de 2011

Título: Diseño y construcción de una instalación experimental para la visualización de flujos oscilatorios.

Autor: Eduardo Cañada Santurino

Director: Wilfried Coenen

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 21 de Julio de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

A mi tutor, Wilfried Coenen, que en todo momento estuvo disponible para discutir sobre el proyecto y por sus ganas de echarme una mano siempre que la necesitase.

A los técnicos de fabricación del departamento de Térmica y Fluidos, Israel Pina García y David Díaz González por su excelente trabajo a la hora de fabricar todo lo necesario para el proyecto, y por su participación activa en el proyecto al proponer mejoras en lugar de simplemente fabricar los componentes.

A Pablo Martínez-Legazpi Aguilo, por su ayuda con el montaje del sistema óptico del láser, y por aceptar ser el tutor para los trámites del proyecto, al no poder serlo oficialmente Wilfried.

A Carlos Marcos Lucas por su ayuda al montar el circuito que permitió poder visualizar correctamente la señal del sensor en el osciloscopio, pese a no disponer de mucho tiempo para ello.

Y finalmente a la Universidad Carlos III de Madrid, por estos años que he sufrido, pero también disfrutado y sobre todo aprendido con un profesorado motivado y con unas instalaciones modernas y bien cuidadas.

Resumen

El presente proyecto se centra en el diseño y fabricación de un aparato destinado a realizar experimentos de *steady streaming* con dos cilindros, o lo que es lo mismo, hacer vibrar dos cilindros en un fluido (en nuestro caso agua) y estudiar los flujos que se generan en torno a los mismos.

El núcleo principal del proyecto es el diseño del aparato de experimentación mediante la herramienta informática *Solid Edge*, pero también incluye varios experimentos realizados con el aparato diseñado, con el objetivo de demostrar de forma intuitiva que los casos predichos por la teoría de Wilfried Coenen y Norman Riley son correctos.

Dichos experimentos se han realizado con un plano láser proyectado en un tanque de agua sembrada con micro partículas esféricas, que bajo el efecto de la luz del láser se hacían visibles, desvelando los flujos presentes en el plano. Dicho plano se ha fotografiado mediante una cámara de fotos digital apuntando a un espejo colocado bajo el plano láser. Los flujos visibles en las fotos han sido también analizados en el último capítulo del presente proyecto.

Palabras clave:

- *Steady Streaming*
- Experimentación
- Diseño
- Cilindros
- Flujo oscilatorio

Abstract

This Project is focused on the design and manufacture of a machine intended to make experiments about steady streaming with two cylinders. This means to experiment vibrating two cylinders inside a fluid (water in this case) and studying the different flows generated around them.

The main part of the project is the design of the different parts of the equipment with the software *Solid Edge*, but it also includes several experiments made with the designed equipment with the objective of demonstrating that the theory developed by Wilfried Coenen and Norman Riley is correct.

These experiments have been done with a laser plane projected through a water tank where the cylinders were immersed. The water had a certain quantity of micro particles that glowed with the effect of the laser light, unveiling the present flows around the cylinders. The laser plane has been photographed with a digital camera and the pictures have been analyzed at one of the chapters of this project.

Keywords:

- Steady Streaming
- Experimentation
- Design
- Cylinders
- Oscillatory flow

Índice

Agradecimientos	5
Resumen	7
Abstract	9
Indice de imágenes	13
Indice de tablas	14
Capítulo 1: Introducción y objetivos	15
1.1 Introducción	15
1.2 Objetivos.....	16
Capítulo 2: Estudios teóricos previos	17
2.1 Descripción	17
2.2 Conclusiones de la teoría previa	21
Capítulo 3: Proceso de diseño	22
3.1 Análisis del experimento y fijación de objetivos.....	22
3.2 Diseño del elemento de sujeción de los cilindros	24
3.3 Aspecto final del elemento de sujeción de los cilindros	26
3.4 Diseño del elemento de sujeción del motor	28
3.5 Aspecto final del elemento de sujeción del motor	29
3.6 Diseño del mecanismo de transmisión del motor a los cilindros	30
3.7 Montaje y sistemas auxiliares	31
3.8 Rangos de funcionamiento del sistema	39
Capítulo 4: Experimentación	40
4.1 Método de experimentación y calibración de la instalación	40
4.2 Primer experimento	43
4.3 Segundo experimento	44
4.4 Tercer experimento.....	46
4.5 Cuarto experimento	47
4.6 Quinto experimento	48
4.7 Sexto experimento	50

Capítulo 5: Conclusiones	53
5.1 Conclusiones de los experimentos.....	53
5.2 Posibles mejoras futuras en la instalación	54
Capítulo 6: Bibliografía	56
Capítulo 7: Anexos	57

Índice de imágenes

Imagen 1: Esquema de definición de parámetros	17
Imagen 1-a: Esquema del caso $\Phi = 0$	18
Imagen 1-b: Esquema del caso $\Phi = \pi/4$ ($g_a > 1.08$)	18
Imagen 1-c: Esquema del caso $\Phi = \pi/4$ ($0.5 < g_a < 1.08$)	18
Imagen 1-d: Esquema del caso $\Phi = \pi/4$ ($g_a < 0.5$)	19
Imagen 1-e: Esquema del caso $\Phi = \pi/2$	19
Imagen 2: Ejemplo de otro experimento de <i>Steady Streaming</i>	21
Imagen 3: Imagen del aparato de experimentación fallido	22
Imagen 4: Imagen del motor seleccionado (tomada de su <i>data sheet</i>)	23
Imagen 5: Esquema del motor	23
Imagen 6: Diseño inicial del sistema porta-cilindros	24
Imagen 7: Diseño mejorado del sistema porta-cilindros	25
Imagen 8: Diseño final del sistema porta-cilindros	26
Imagen 9: Imagen real del sistema porta-cilindros	27
Imagen 10: Placas de metacrilato para sujetar los cilindros esbeltos	27
Imagen 11: Diseño inicial del elemento de sujeción del motor	28
Imagen 12: Diseño final del elemento de sujeción del motor	29
Imagen 13: Imagen real del elemento de sujeción del motor	29
Imagen 14: Sistema de transmisión de movimiento	30
Imagen 15: Pecera con la mesa y los mecanismos ya montados sobre la pecera	31
Imagen 16: Imagen de la fuente de alimentación del motor	32
Imagen 17: Imagen del sensor magnético	33
Imagen 18: Imagen del osciloscopio digital empleado	34
Imagen 19: Imagen del laser empleado	35
Imagen 20: Imagen descriptiva del sistema óptico empleado	36
Imagen 21: Esquema del interior de la pecera	37
Imagen 22: Imagen de la cámara de fotos digital utilizada	37
Imagen 23: Imagen de toda la instalación lista para funcionar	38
Imagen 24: Comparación entre imagen del experimento sin procesar y procesada	40
Imagen 25: Fotografía del plano de experimentación en reposo	41
Imagen 26: Fotografía del plano de experimentación en movimiento	42
Imagen 27: Fotografía del experimento 1	43
Imagen 28: Fotografía del experimento 2	44
Imagen 29: Fotografía explicativa del experimento 2	45
Imagen 30: Fotografía del experimento 3	46
Imagen 31: Fotografía del experimento 4	47
Imagen 32: Primera fotografía del experimento 4	48
Imagen 33: Segunda fotografía del experimento 4	49
Imagen 34: Fotografía del experimento 5	50
Imagen 35: Primera fotografía del experimento 6	51
Imagen 36: Segunda fotografía del experimento 6	52
Imagen 37: Ejemplo de display utilizable para mostrar la velocidad	55

Índice de tablas

Tabla 1: Ejemplos que se podrían poner a prueba en la fase experimental.....	20
Tabla 2: Rangos de utilización de las placas de metacrilato	39
Tabla 3: Rangos de utilización de los cilindros	39
Tabla 4: Rangos de funcionamiento del motor	39

Capítulo 1:

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

El presente proyecto partirá directamente de la teoría desarrollada por Wilfried Coenen y Norman Riley sobre dos cilindros sometidos a un flujo oscilatorio, lo que se conoce como *Steady Streaming*. Se diseñará un aparato de experimentación que permitirá comprobar si la teoría expuesta es correcta.

El diseño se basará en el análisis de los fallos otro aparato que se construyó pero no funcionó por errores graves de diseño y de elección de materiales. Tras los análisis del aparato anterior, se diseñará todo el mecanismo en la aplicación informática *Solid Edge* para poder entregar a los encargados de su fabricación unos planos lo más precisos posibles.

Simultáneamente al diseño del aparato, se harán cálculos sencillos para determinar el motor que será necesario adquirir para poder realizar los experimentos sin problemas.

Una vez fabricado el aparato de experimentación, se instalarán todos los elementos auxiliares que se necesitan para la realización de los distintos experimentos, como la fuente de alimentación del motor, un osciloscopio, el láser y sistema óptico, etcétera

Finalmente, llegados a este punto se realizarán diferentes experimentos con los que se tratará de demostrar la veracidad de la ya mencionada teoría desarrollada por Wilfried Coenen y Norman Riley.

Todos estos apartados han sido estructurados en este mismo orden cronológico para una mayor facilidad de lectura y comprensión del proyecto en su totalidad.

1.2 Objetivos

Como ya se ha descrito en la introducción, el principal objetivo del presente proyecto es el diseño de un aparato experimental que permita realizar experimentos de *Steady Streaming* satisfactoriamente. En la siguiente lista se detallan los sub-objetivos que se fueron completando a lo largo del proyecto:

- Análisis del aparato experimental fallido.
- Diseño del sistema de sujeción de los cilindros.
- Diseño del sistema de sujeción del motor.
- Conexión entre ambos sistemas
- Prueba del sistema
- Adición de sistemas auxiliares
- Puesta a punto del sistema
- Realización de experimentos

Capítulo 2:

Estudios teóricos previos

2.1 Descripción

En el presente proyecto de fin de carrera se realizarán experimentos que tratarán de confirmar la teoría ya estudiada previamente por el director del proyecto, Wilfried Coenen, y por el profesor Norman Riley, de la Universidad de East Anglia. En este apartado se resumirá brevemente la teoría ya desarrollada por dichos profesores. Cabe destacar que el *Steady Streaming* es un fenómeno que se ha estudiado desde hace décadas. El estudio realizado por dichos profesores se centra en el caso de dos cilindros paralelos.

Dicha estudio analiza el flujo alrededor de dos cilindros estáticos, cada uno con radio a , que se sitúan en un fluido oscilatorio que, a grandes distancias del par de cilindros, es unidireccional. Dos de los parámetros investigados son la distancia entre los cilindros g_a y el ángulo Φ que el flujo forma con la línea que une los centros de los cilindros. Se asume que el parámetro ε , definido como la relación entre la amplitud de oscilación y el radio de los cilindros, es pequeño. Dicho flujo oscilatorio cumple que su velocidad $U = d \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$, donde ω es la frecuencia del movimiento.

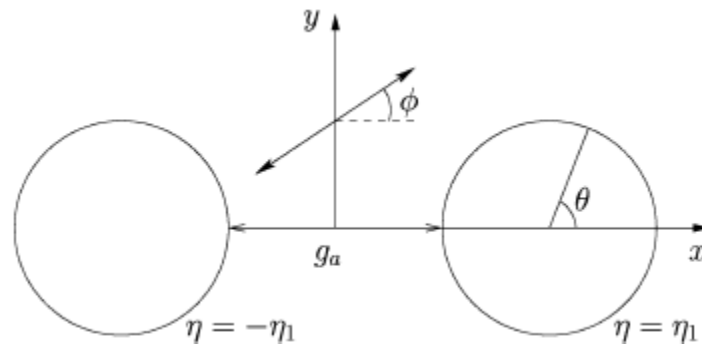


Imagen 1

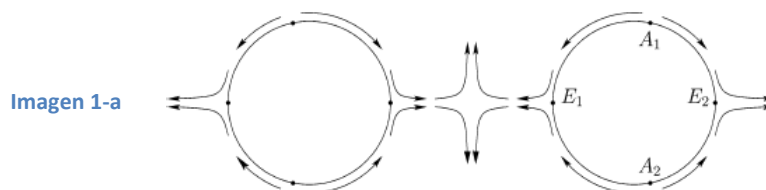
Con $\varepsilon \ll 1$, es posible desarrollar una solución para las ecuaciones que gobiernan el flujo. El fluido es esencialmente irrotacional con efectos viscosos confinados en una fina capa de Stokes muy cerca de la superficie de los cilindros. Los esfuerzos de Reynolds en mencionadas capas persisten en el borde de ellas, e inducen un movimiento estacionario en el tiempo, llamado *Steady Streaming* alrededor de los cilindros. Cuando además el número de Reynolds $R_s = \varepsilon \cdot U \cdot a / \nu$, asociado al *Steady Streaming* y por eso basado en la velocidad εU , es alto, el flujo estacionario de *Steady Streaming* toma un carácter de capa límite. Típicamente hay dos puntos de fijación en los cilindros desde donde el fluido se mueve sobre la superficie. Consecuentemente hay dos puntos en la superficie de los cilindros donde estos flujos colisionan y donde se genera un *jet* de fluidos que escapa del cilindro. Se denominan a esos puntos como puntos de eyección.

En el caso de un solo cilindro, o en el caso de que los cilindros estén muy separados, el momento generado en cada punto de ejecución, para ambos lados, será idéntico. Como consecuencia, el *jet* que emerge será normal a la superficie del cilindro. Esto ya lo habían observado Davidson y Riley. Sin embargo, en la situación considerada, donde el flujo alrededor de un cilindro está influenciado por la presencia del otro cilindro, el momento en cada punto de eyección será diferente. Como consecuencia, el *jet* que escapa de la superficie del cilindro ya no será normal a su superficie. Esta situación la habían detectado ya Riley y Wybrow (2009), donde la visualización del flujo había confirmado claramente la presencia de *jets* emergiendo de la superficie con un ángulo de inclinación apreciable.

Se omitirá en adelante todo el proceso teórico debido principalmente a que no es el objetivo de este proyecto. Sin embargo, se incluyen ahora los resultados y conclusiones obtenidas teóricamente por el estudio citado.

En las siguientes imágenes las flechas representan el camino que tomará el fluido al interactuar con los cilindros. De esta manera se pueden ver los mencionados jets como el par de flechas salientes de los cilindros.

Caso $\Phi = 0$



Caso $\Phi = \pi/4$ (para tres distancias distintas entre cilindros)

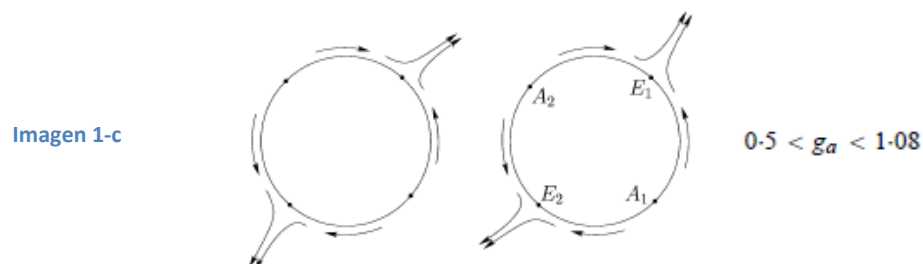
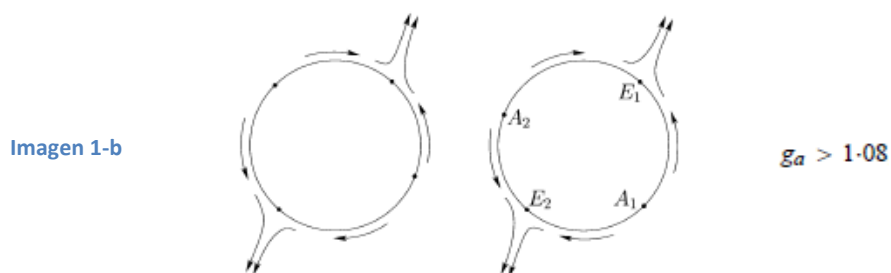
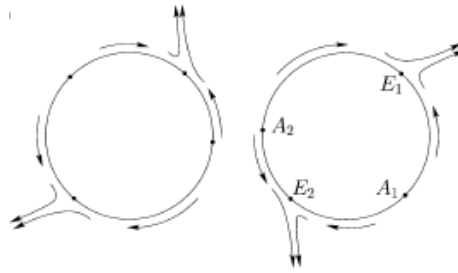


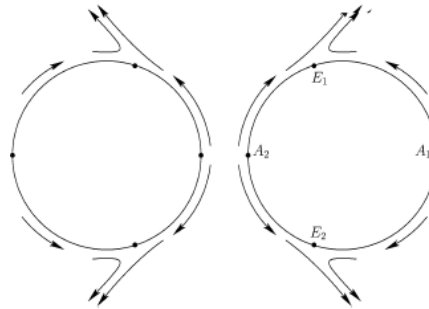
Imagen 1-d



$$g_a < 0.5$$

Caso $\Phi = \pi/2$

Imagen 1-e



Una vez definidos los parámetros del sistema y los resultados esperados; y para poder definir los parámetros de diseño del aparato de experimentación, se realizan los siguientes cálculos:

Definimos de nuevo el parámetro ε como la relación entre la amplitud de oscilación y el radio de los cilindros:

$$\varepsilon = \frac{d}{a}$$

Sustituyendo $d = U/\omega$ en la anterior ecuación, obtenemos:

$$\varepsilon = \frac{U}{\omega \cdot a} \quad ; \quad U = \varepsilon \cdot \omega \cdot a$$

Sabiendo que el valor del Streaming Reynolds, R_s es igual a:

$$R_s = \frac{U^2}{\omega \cdot \nu}$$

Si despejamos ω de la fórmula anterior, y sustituimos el valor de U :

$$\omega = \frac{U^2}{R_s \cdot \nu} = \frac{\varepsilon^2 \cdot \omega^2 \cdot a^2}{R_s \cdot \nu}$$

De la formula anterior despejamos ω y sustituimos $\varepsilon = \frac{d}{a}$, obteniendo:

$$\omega = \frac{R_S \cdot v}{a^2 \cdot \varepsilon^2} = \frac{R_S \cdot v}{d^2}$$

Con esta fórmula podemos hallar la velocidad angular del motor que necesitamos para cada caso. Teniendo en cuenta el radio en el que se colocaría el eje de la biela (d), podemos hallar también el periodo. En la siguiente tabla están recogidos distintos ejemplos que se podrían poner a prueba en la fase experimental.

ε	R_S	a	d	$\omega = \frac{R_S \cdot v}{d^2}$	T
0.1	50	1 cm	1 mm	50 = 477,4 rpm	0,125 s
0.1	100	1 cm	1 mm	100 = 954,9 rpm	0,0628 s
0.2	50	1 cm	2 mm	12,5 = 119,4 rpm	0,503 s
0.2	100	1 cm	2 mm	25 = 238,7 rpm	0,251 s
0.3	100	2 cm	4 mm	6,25 = 59,7 rpm	1 s
0.3	200	2 cm	4 mm	12,5 = 119,4 rpm	0,5 s

Tabla 1

Como sabemos, la velocidad de giro en r.p.m. puede obtenerse de dicha velocidad angular ω mediante la siguiente conversión (utilizando 50 Hz como ejemplo):

$$50 \frac{\cancel{rad}}{s} \cdot \frac{60s}{1 \min} \cdot \frac{1 \text{ vuelta}}{2\pi \cancel{rad}} = 477,4 \text{ rpm}$$

El periodo, a su vez, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Como conclusión de estos cálculos podemos averiguar el rango de velocidades que el motor debe satisfacer. Como podemos ver, debe alcanzar por lo menos magnitudes de 1000 rpm sin falta de potencia, hecho que el motor finalmente elegido cumplió con creces.

2.2 Conclusiones de la teoría previa

Como puede observarse, para todos los casos anteriores aparecen las eyecciones de fluido en forma de *jet*. Mediante el aparato de experimentación cuidadosamente diseñado, se tratará de demostrar que lo calculado en estos distintos casos es correcto, así como experimentar en casos distintos a los obtenidos en la teoría. Para ello, el aparato de experimentación dispondrá de distintas posiciones para permitir realizar los experimentos a distintos ángulos de vibración. También deberá permitir colocar los cilindros a distintas distancias entre sí, dado que ambos parámetros se estudian en la teoría, y deben ser también parámetros variables en la práctica. Obviamente, en el experimento en lugar de hacer vibrar el agua, se harán vibrar los cilindros. El fenómeno físico que se generará será exactamente el mismo, pero con una facilidad mucho mayor de realización.

Para la visualización de los flujos generados alrededor de los cilindros, se dispondrán partículas en un medio acuoso, en el que vibrarán los cilindros. Dichas partículas se iluminarán con un láser formando un plano, que será registrado por una cámara de fotos digital.

Los resultados obtenidos deberían ser similares a los obtenidos mediante este método, en experimentos de *Steady Streaming* realizados con una esfera como los que se muestran en las imágenes siguientes (realizados por Charlotte W. Kotas, Minami Yoda y Peter H. Rogers, 2006):

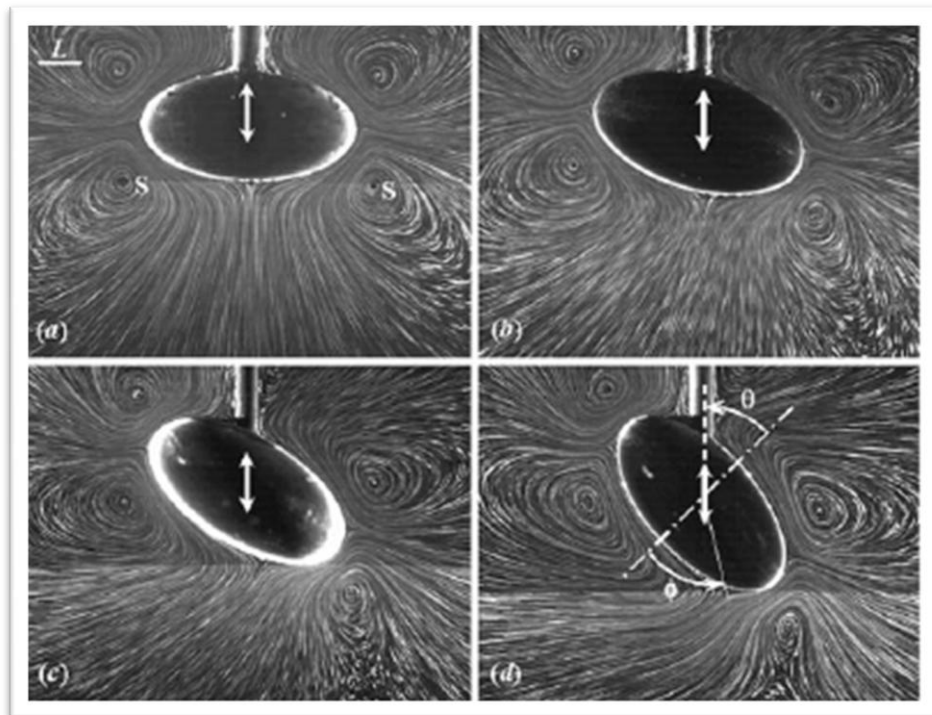


Imagen 2

Capítulo 3:

Proceso de diseño

3.1 Análisis del experimento y fijación de objetivos

Antes de empezar a analizar nada hay que destacar que aunque en la teoría se explica el caso como el movimiento del fluido en torno a los cilindros, en la práctica se van a mover los cilindros dentro del fluido, ya que el caso es equivalente.

Para el proceso de diseño inicial, el primer paso a seguir fue discutir con el tutor los objetivos del proyecto, para así poder identificar las necesidades que debía satisfacer el aparato de experimentación que se debía diseñar. Tras dicha discusión y una vez asimiladas las características que el aparato debía tener, se analizó el anterior intento de desarrollo del experimento, analizando cuidadosamente las razones por las que dicho aparato resulto no ser válido para realizar los experimentos.



Imagen 3

Como puede verse en la anterior, el material que se utilizó para soportar todo el mecanismo de los cilindros era de madera aglomerada. Este material resulto ser una muy mala elección ya que en presencia de la humedad de la pecera de los experimentos, dicha madera se deformaba enormemente, haciendo imposible realizar los experimentos. Debido a ese problema, el nuevo material a utilizar para dar soporte a todo el mecanismo debería ser un material resistente a la humedad. Por su precio y su facilidad de mecanizado, se eligió PVC para realizar el soporte.

Otro gran problema que tenía el primer aparato de experimentación fue la holgura. En la junta de la pieza que generaba la excentricidad del movimiento, con el carro de los cilindros, existía una gran holgura debido a los distintos tamaños del taladro y la pieza pasante. Por ello, el movimiento generado no era adecuado.

Finalmente, el diseño que se hizo para soportar los cilindros fue un disco con distintos taladros, obtenidos de una chapa de 2 milímetros de espesor. Resulto ser demasiado fina, ya que bajo los esfuerzos generados por los cilindros (por efecto del agua, y por su propia masa) dicha chapa se deformaba invalidando también así el experimento.

Tras este proceso, se utilizaron los cálculos previos para seleccionar el motor adecuado para el experimento, seleccionando finalmente un motor DC de marca *COMO DRILLS* con caja reductora 16:1, así como un variador de voltaje para modificar su velocidad, y un sistema para medir la velocidad magnéticamente. En la siguiente imagen se puede ver el motor y su plano (imágenes obtenidas de su hoja de especificaciones):

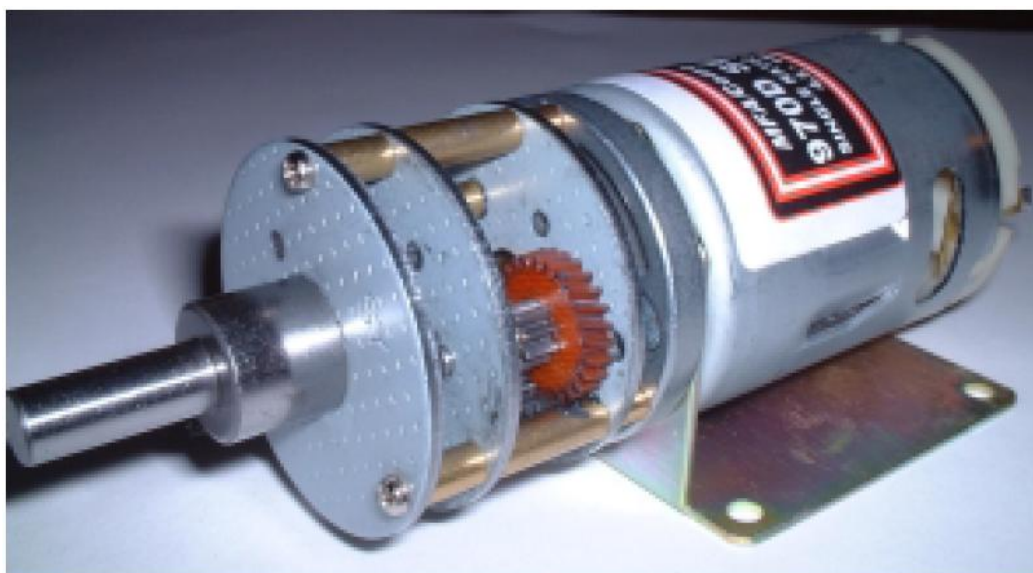


Imagen 4

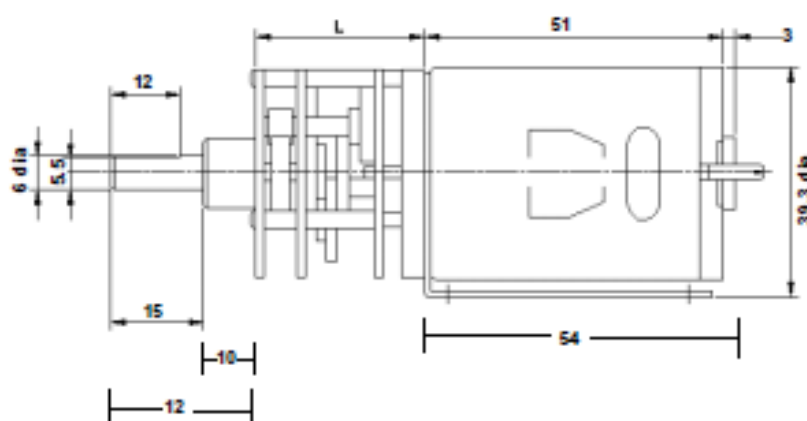


Imagen 5

3.2 Diseño del elemento de sujeción de los cilindros

Teniendo en mente todos los problemas mencionados antes, se desarrolló un primer diseño para dar soporte a los cilindros, que puede verse en la imagen 6.

Este diseño se basa en un disco con taladros a 0° , 30° , 45° , 60° y 90° para poder realizar los experimentos con estas posibles inclinaciones de los cilindros respecto al eje de movimiento. Para su sujeción, se dispone de dos ranuras para poder montar los cilindros a cualquier distancia de separación dentro de los límites del diseño. Para el movimiento de los cilindros, este disco está montado sobre un soporte que se monta sobre la ranura efectuada en la base de PVC.

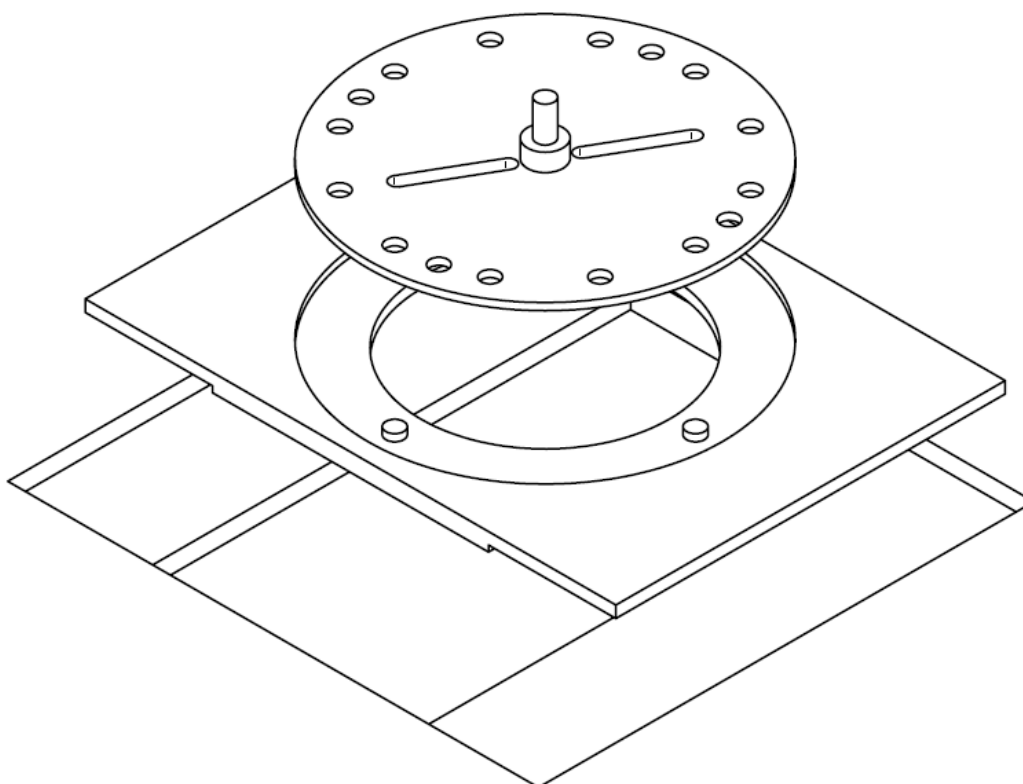


Imagen 6

Tras comentar el diseño con el tutor del proyecto, se procedió a comentar dicho diseño a los técnicos del laboratorio, para contrastar las ideas con su experiencia en este tipo de trabajos. Tras tener en cuenta sus múltiples consejos, se modificó el diseño hasta llegar al siguiente diseño preliminar (imagen 7), que fue el que se procedió a enviar a los técnicos de fabricación para su realización en el taller de la universidad.

Las principales modificaciones realizadas fueron:

- Aumento del espesor del carro.
- Adición de guías para un mejor guiado del movimiento del carro.
- Adición de taladros a 15° a la pieza superior
- Adición de un taladro al carro para su sujeción con el eje proveniente del motor.
- Mecanizado de los laterales para añadir futuras medidas de sujeción para evitar que el carro pueda levantarse de las guías.

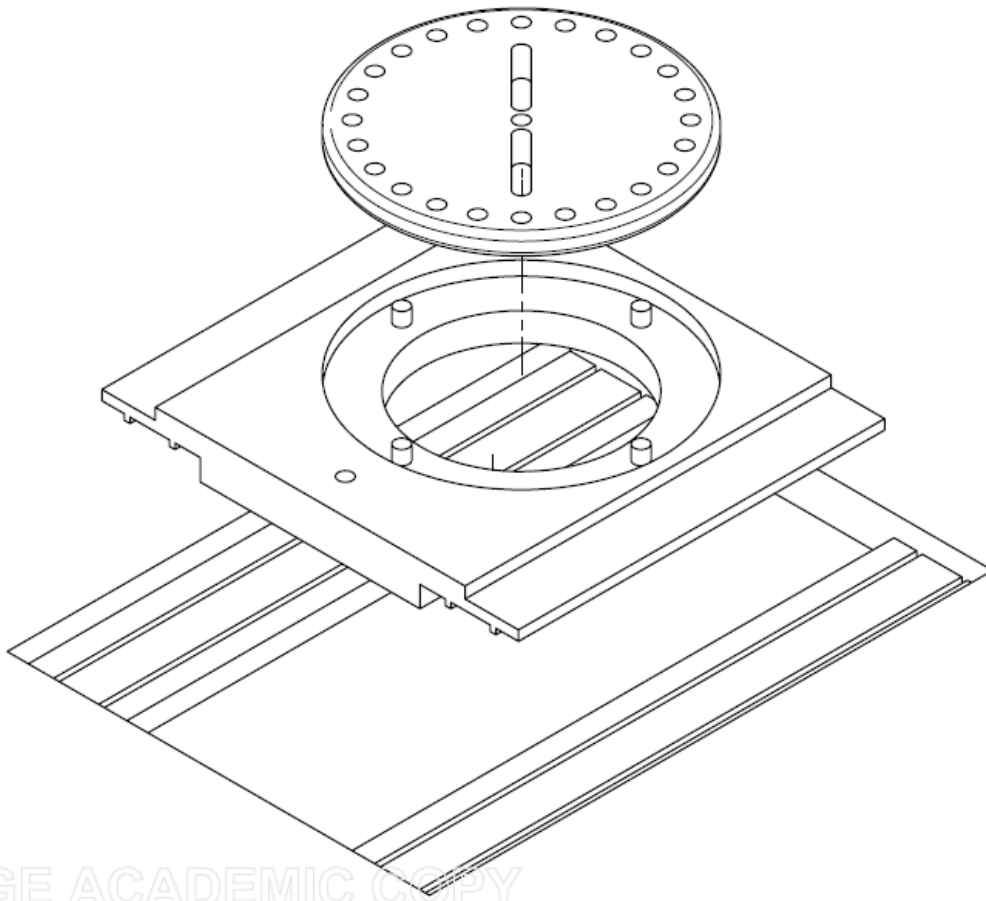


Imagen 7

3.3 Aspecto final del elemento de sujeción de los cilindros

Durante la fabricación del elemento de sujeción descrito, los técnicos realizaron cambios sustanciales para facilitar la fabricación de los elementos, así como para mejorar el diseño conforme a su dilatada experiencia en la fabricación de elementos de este tipo. Dichas modificaciones, como puede verse en la imagen 8, son las siguientes:

- Modificación de la forma del soporte de la pieza de los cilindros, para que su fabricación sea más sencilla partiendo de un tocho para torno.
- Adición de guías a la base en lugar de al soporte, así como las ranuras necesarias en el mismo de forma que encajen perfectamente entre sí.
- Adición de dos soportes laterales para asegurar la correcta colocación del soporte sobre las vías.
- Adición de planos a las piezas de revolución para tener planos de referencia útiles para posibles modificaciones posteriores.

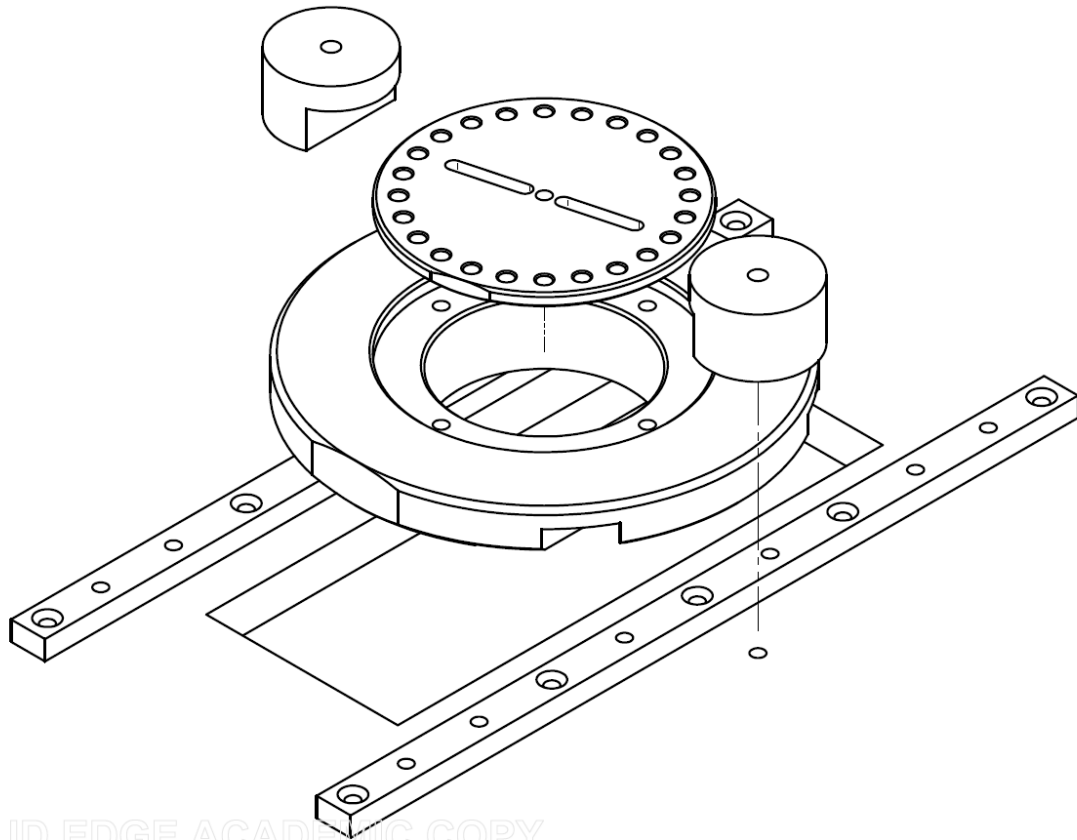


Imagen 8

En la siguiente imagen puede verse dicho mecanismo ya fabricado, montado y probado. A la pieza que sujeta a los cilindros se le ha añadido un pequeño asidero para poder retirar dicha pieza fácilmente para la sustitución de los cilindros. Además, se ha conectado el soporte al motor mediante el eje que puede apreciarse en la imagen.

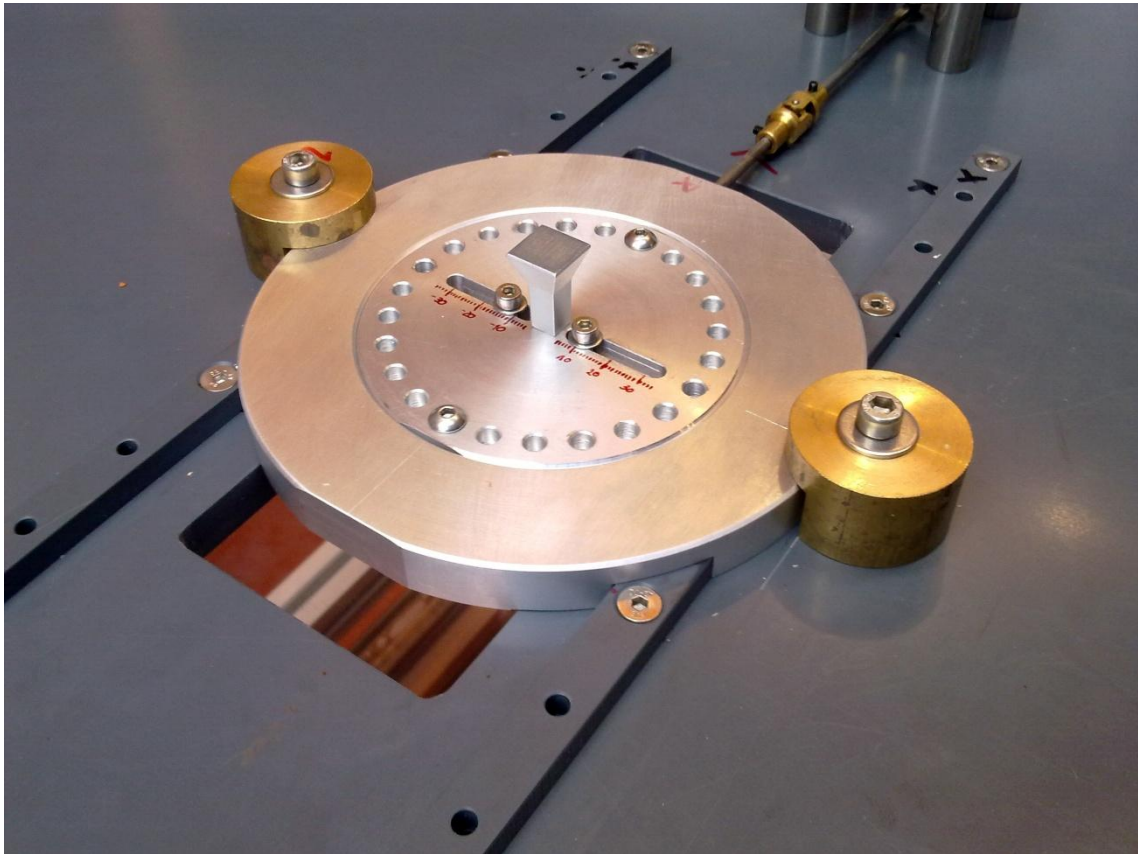


Imagen 9

Como puede apreciarse, se pintó una escala milimétrica para montar más fácilmente los cilindros. Posteriormente a esta foto también se añadieron los distintos ángulos que corresponden a cada agujero destinado a girar la pieza superior.

Para dar a los cilindros más esbeltos una mayor integridad se diseñaron y fabricaron unas placas de metacrilato con orificios para poder colocarlas en el extremo libre de los cilindros y unirlos entre sí, sin que dichas placas entorpecieran la visibilidad de los experimentos.

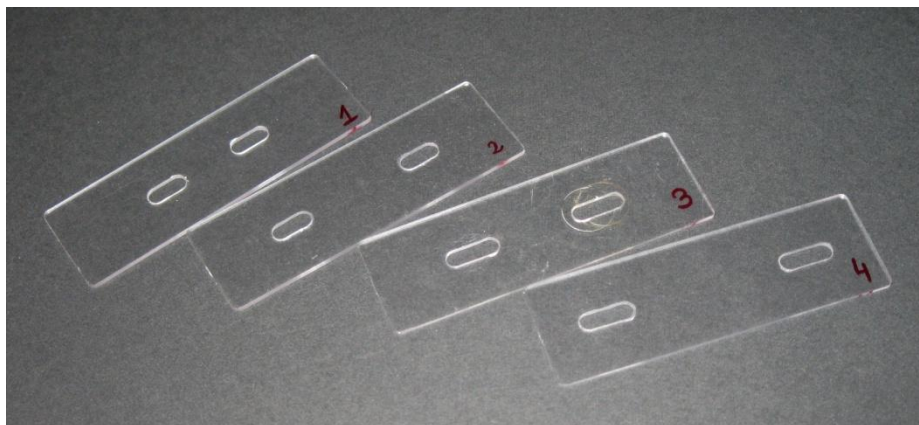


Imagen 10

3.4 Diseño del elemento de sujeción del motor

Para la sujeción del motor, se repitió el mismo procedimiento que con el elemento de sujeción de los cilindros. Primero, se discutió con el tutor y los técnicos la forma de colocar el motor, comparando ideas con la solución adoptada en el aparato de experimentación inicial. Las conclusiones a las que se llegó con esa discusión fueron, principalmente:

- El eje del motor debería estar preferentemente colocado de forma vertical
- El motor debería disponer de un sistema que permitiera variar su altura, para poder alinearlo de forma precisa al carro
- Se decidió reutilizar el sistema de transmisión del movimiento, desde el motor al carro, del experimento fallido.

Así, teniendo en cuenta todos estos puntos, se diseñó un sistema para variar la altura mediante una rosca. Para ello, se diseñó una pieza roscada que se intercalaría entre el motor y la caja reductora, que iría dentro de otra pieza roscada. Para fijar la posición se diseñó también una pieza simple roscada que se colocaría superiormente.

Para la sujeción de todo ese sistema, se diseñaron dos chapas, una en forma de U y otra en forma de Z, que sujetarían las piezas roscadas limitando cualquier movimiento indeseado del sistema una vez puesto en marcha. La decisión de usar chapa para soportar el motor, fue por intentar que el proceso de fabricación fuera lo más barato y sencillo posible.

Posteriormente se diseñó la pieza que iría sujeta al eje del motor, y que proporcionaría los distintos radios de excentricidad al movimiento, mediante ocho taladros distintos colocados a radios de uno a ocho milímetros.

El explosionado de todo el conjunto puede verse en la imagen 11 que acompaña al texto. La pieza rectangular colocada en la posición inferior es una sección reducida de la pieza de PVC de la base. Sobre ella se montarían las piezas de chapa, y sobre estas la pieza roscada, dentro de la cual iría la pieza que sujeta al motor, que se representa en la posición superior del explosionado.

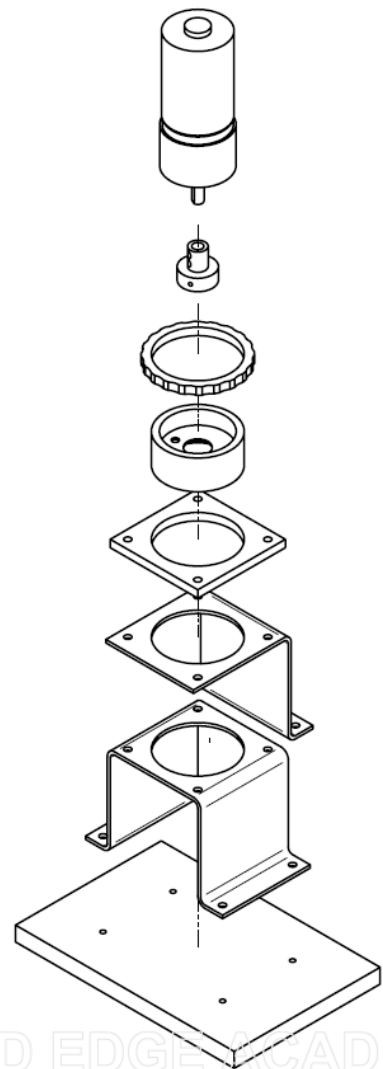


Imagen 11

3.5 Aspecto final del elemento de sujeción del motor

Al igual que con el sistema de sujeción de los cilindros, el diseño del sistema de sujeción del motor sufrió cambios durante su elaboración. Dichos cambios fueron efectuados de nuevo por los técnicos encargados de su fabricación, y pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Sustitución de las planchas en U y Z por columnas, debido a la imposibilidad de fabricarlas. No hay una plegadora capaz de hacer esas formas a disposición de los técnicos.
- Fabricación de algunas piezas redondas en lugar de cuadradas, ya que su fabricación se realiza en torno.

En las imágenes que acompañan a este texto, puede verse el aspecto final del conjunto explosionado, así como su aspecto final una vez instalado en el PVC y listo para funcionar a falta de la alimentación del motor.

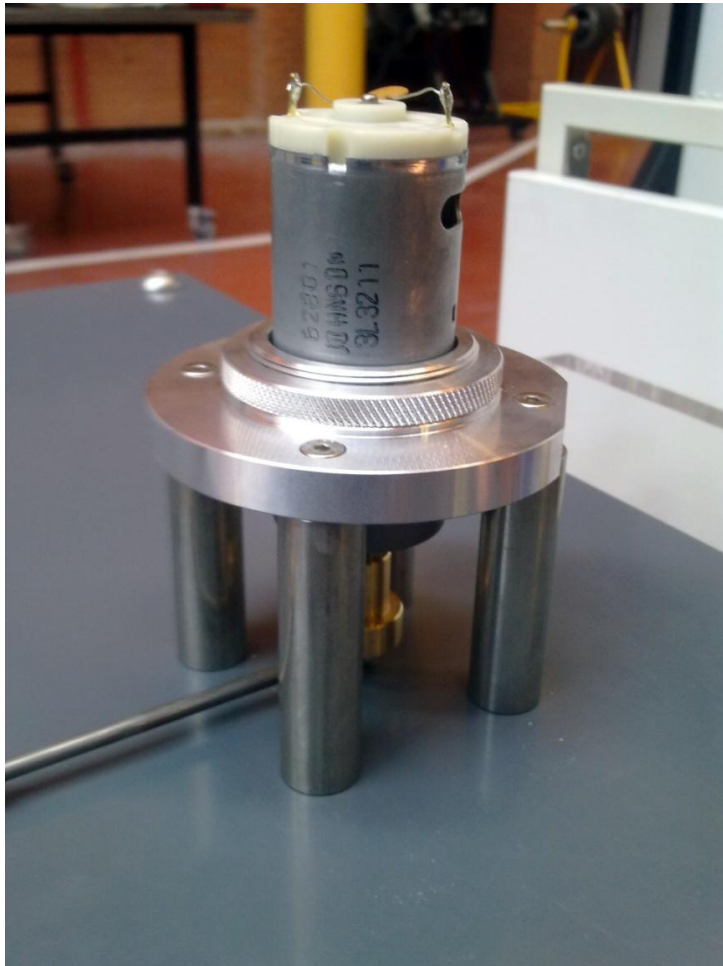


Imagen 13

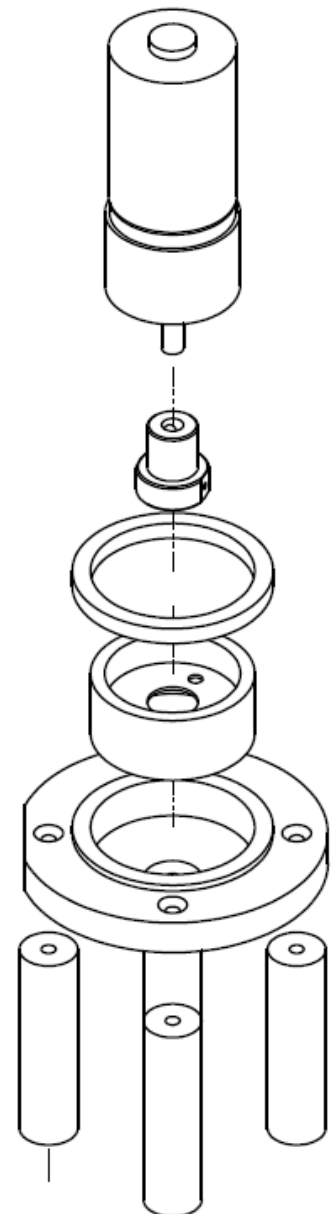


Imagen 12

3.6 Diseño del mecanismo de transmisión del motor a los cilindros

En este apartado se detallará más la cadena de piezas que se ha utilizado para la transmisión del movimiento angular del motor, a los cilindros.

El planteamiento básico del que se partió para diseñar este sistema, fue el de un mecanismo biela-manivela sencillo, en el que la amplitud total del movimiento oscilatorio estará definida por el radio de la biela. Para poder modificarlo, la pieza diseñada para encajar en el eje del motor consta de una serie de orificios roscados, en los que se puede introducir un tornillo que está conectado a la manivela, que a su vez se conecta al soporte de los cilindros. Dicha pieza se fabricó de latón en lugar de aluminio, debido a que es una pieza que se va a ver sometida a esfuerzos que podrían dañar las roscas de los orificios.

Para que el mecanismo funcione, en el extremo de la manivela, la misma debe poder girar libremente. Para posibilitar este movimiento se decidió utilizar una junta tipo *cardán*, tal y como puede verse en las siguientes imágenes de detalle de todas las piezas mencionadas.

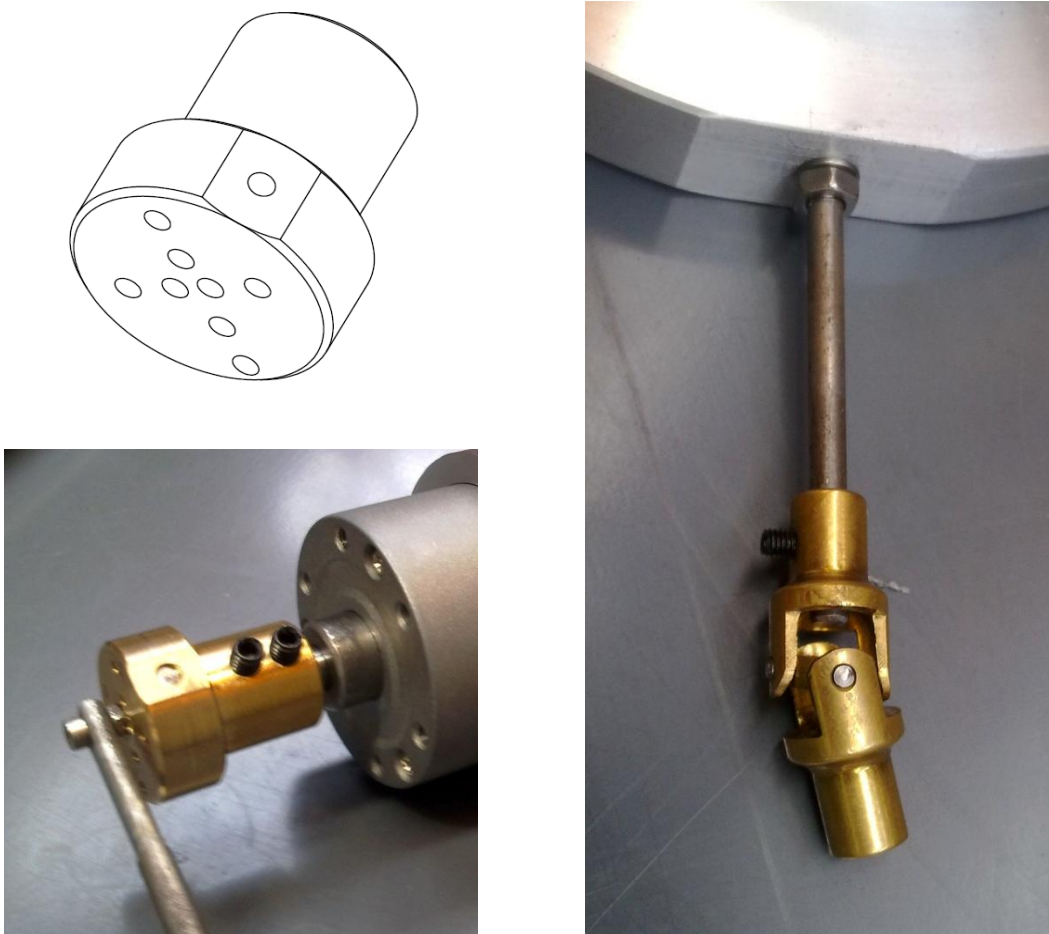


Imagen 14

3.7 Montaje y sistemas auxiliares

En este apartado se describirán las diferentes soluciones adoptadas para posibilitar la realización de los experimentos.

- **Pecera:** Para poder realizar los experimentos se disponía de una pecera fabricada con metacrilato en la universidad. Para poder posicionar todo el aparato destinado a hacer vibrar los cilindros, se colocó la base de PVC sobre unas patas de metal hechas con perfiles de aluminio. Para dar rigidez estructural a la misma, se colocaron refuerzos entre ellas por debajo de la pecera, pero sin unir solidariamente ambas estructuras para no provocar vibraciones en el agua de la pecera que podrían alterar los resultados de los experimentos.

Para suavizar el funcionamiento del aparato, se tomaron dos diferentes medidas. Primero se colocaron trozos de silicona bajo las patas, para mitigar las vibraciones que se generaban durante el funcionamiento del aparato. Este cambio suavizó sustancialmente el funcionamiento del aparato. Segundo, se añadió vaselina a las guías bajo la pieza portadora de los cilindros, lo que también mejoro el funcionamiento del aparato.

Aparte de en la imagen siguiente puede apreciarse la pecera con la mesa y los mecanismos ya montados sobre la pecera, a falta de colocar los travesaños entre las patas de la mesa por debajo de la pecera.



Imagen 15

- **Fuente de alimentación:** Para alimentar al motor, se utilizó una fuente de alimentación marca *BLAUSONIC* de la universidad con la que se podía suministrar corriente continua modificando tanto voltaje como corriente. El rango de voltaje suministrable es de 0 a 90 V, con un amperaje máximo de 2,5 A. Dicha fuente puede verse en la imagen 16.



Imagen 16

Para conectar la fuente al motor se conectaron unos cables a los extremos negro y rojo de la parte izquierda de la imagen, a los polos del motor. Como dicho motor no tiene restricciones de polaridad, no hay que hacer ninguna comprobación a la hora de conectar los cables al mismo.

- **Sensor magnético y osciloscopio:** Para poder regular la velocidad del motor de forma precisa según las velocidades calculadas en el apartado teórico, se instaló un sensor magnético cerca de la pieza conectada al eje del motor. A dicha pieza a su vez se le instaló un tornillo metálico para que el sensor pudiera detectar una señal periódica que se analizaría en el osciloscopio. En la siguiente imagen puede apreciarse en mayor detalle el sensor escogido:

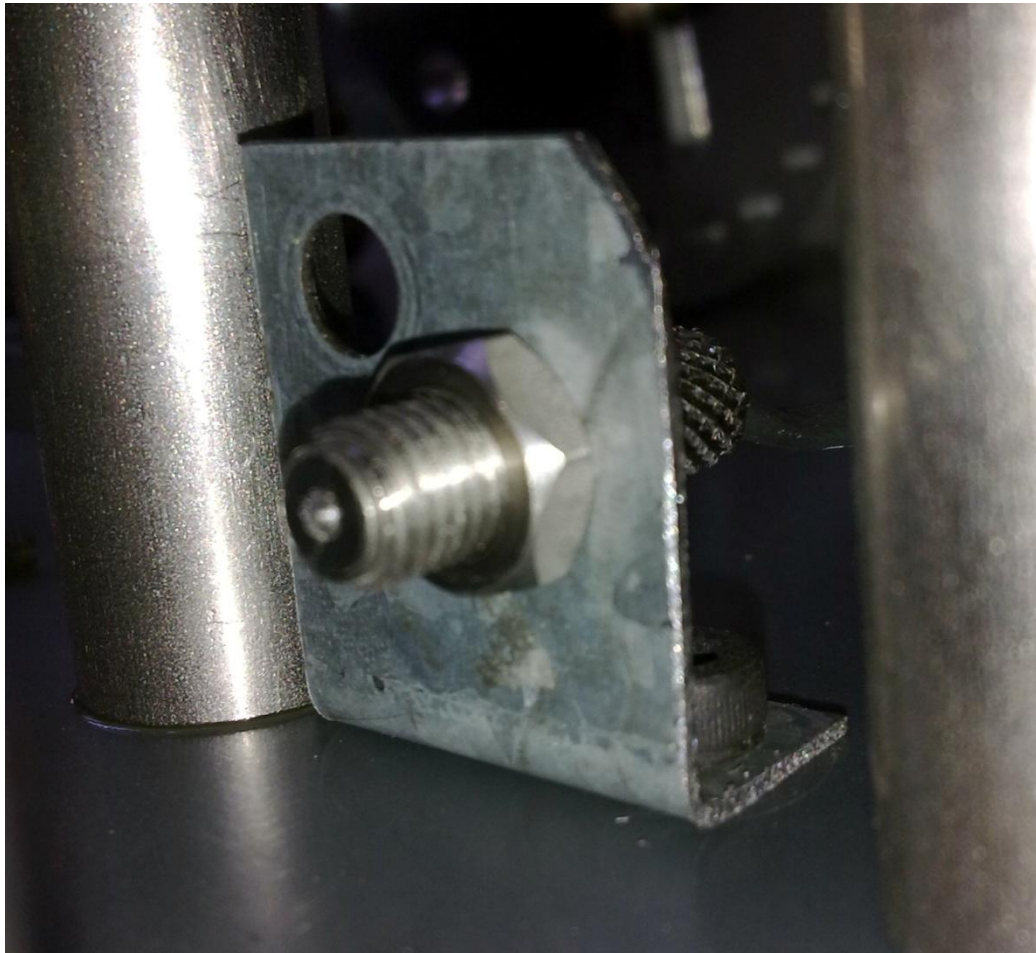


Imagen 17

Para poder analizar la señal enviada por el sensor, se utilizó un osciloscopio digital Yokogawa DL1520. La conexión entre el sensor y el osciloscopio requería un pequeño circuito con resistencias, que realizó Carlos Marcos Lucas. Mediante esta instalación, podía medirse la distancia entre los pulsos emitidos por el sensor, y con ella sacar directamente el periodo del movimiento de giro del motor.

En la imagen siguiente puede verse el osciloscopio seleccionado para los experimentos, listo para recoger las mediciones enviadas por el sensor conectado al canal 1 de dicho osciloscopio.



Imagen 18

- **Láser y sistema óptico asociado:** Para poder realizar los experimentos es necesario disponer de una unidad de láser que genere un plano de luz en la zona de experimentación. Para ello se utilizó un láser del fabricante *Ion Laser Technology*, que genera dicho láser mediante los gases nobles Argón y Kriptón.

Para poder ser generado el láser, el sistema se compone de la caja de la izquierda de la imagen. Debido al calor que se genera durante su funcionamiento, dicho sistema cuenta con un ventilador de grandes dimensiones en su parte superior, y de dos ventiladores de menor tamaño en la parte posterior a la mostrada en la imagen.

Además, el sistema dispone de una tapa roscada en el punto de salida del láser, para poder cerrar dicho sistema y poder trabajar con seguridad en caso de estar encendido el sistema.

En la parte derecha de la imagen se puede ver otra “caja”, que no es otra cosa que la fuente de alimentación trifásica que alimenta al sistema generador del láser.

En la siguiente imagen pueden observarse todos los dispositivos mencionados anteriormente.



Imagen 19

Para poder realizar los experimentos con seguridad, se disponía de gafas de protección para evitar quemaduras en los ojos en caso de incidir el láser en el mismo.

Para poder realizar los experimentos, como ya se ha dicho antes, es necesario generar un plano de luz que permita observar las partículas en suspensión introducidas en el agua. Para ello, se construyó un sistema de espejos que podemos ver en la imagen 20, que fue construido con la ayuda de Pablo Martínez-Legazpi.

En la imagen se ha superpuesto el camino seguido por el haz mediante los espejos hasta el sistema de lentes, que es el cilindro negro al que llega el haz. Mediante dos lentes (una cóncava y otra convexa) el haz se abre para formar el plano mencionado.

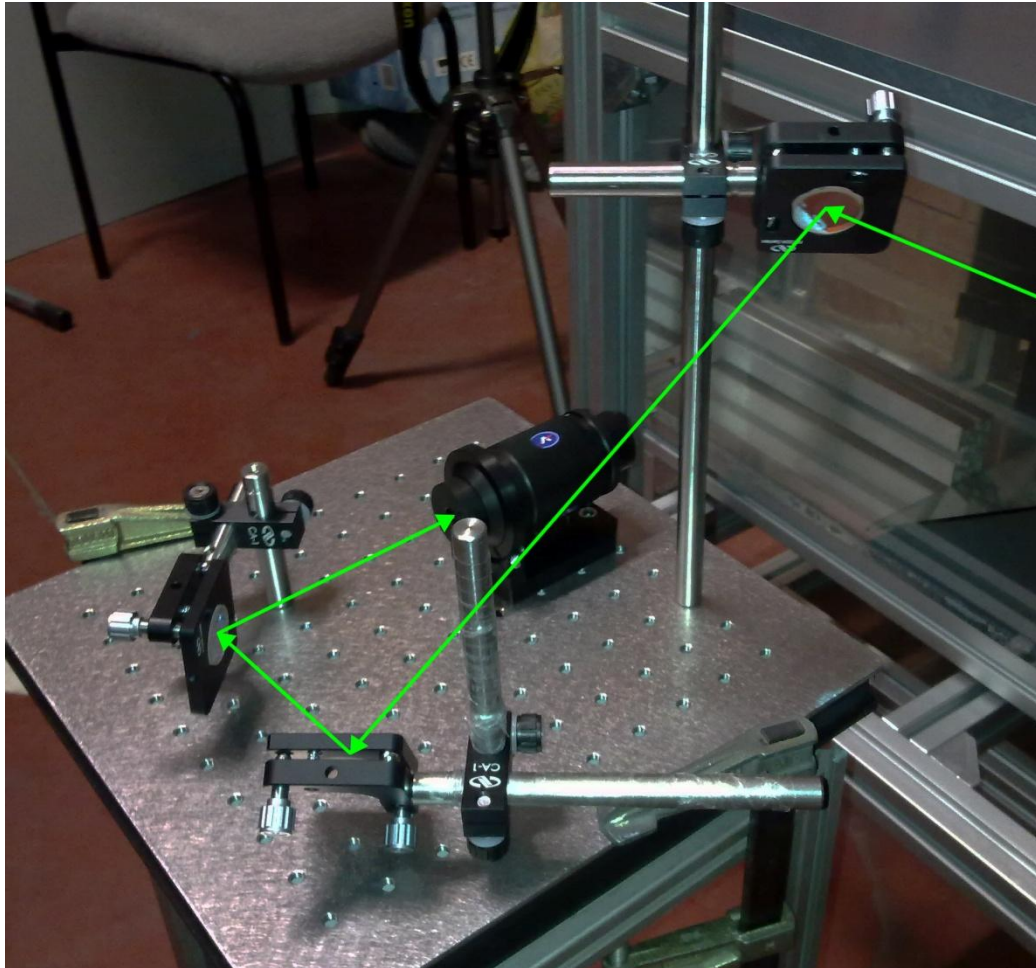


Imagen 20

Para poder redirigir el haz de forma precisa al sistema de lentes, los dispositivos en los que están montados los espejos disponen de unos tornillos que giran lentamente el espejo en una dirección. Cada tornillo gira el espejo en un eje a 90° con el otro espejo.

- **Sistema de fotografiado de los experimentos:** Una vez se han instalado todos los dispositivos anteriores, los experimentos pueden llevarse a cabo. Sin embargo, es necesario preparar la instalación para su correcta visualización, y para poder registrar los resultados para su posterior análisis.

Para ello, se fabricó un soporte para un espejo que se colocaría a aproximadamente 45° debajo de los cilindros, para poder ser observados los experimentos desde una visión inferior.

La instalación del espejo se puede entender mejor mediante el siguiente esquema:

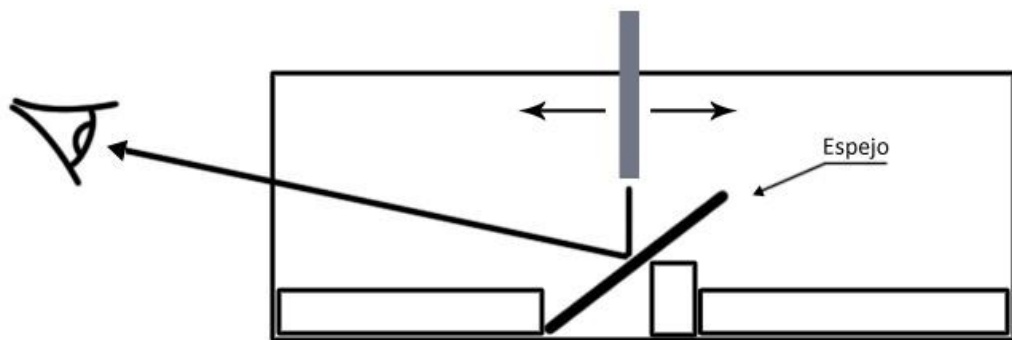


Imagen 21

La razón para no colocar el espejo a 45° fue que el trípode utilizado con la cámara, no permitía colocar la misma a exactamente la altura del plano de experimentación, ya que estaba en su posición más inferior posible.

Dicha cámara puede verse en la imagen que acompaña a estas líneas. Para la realización de las fotografías se ajustaron principalmente los siguientes parámetros, hasta conseguir los resultados deseados:

- Zoom
- Enfoque
- Tiempo de exposición
- ISO



Imagen 22

Finalmente, en la siguiente imagen se muestra la instalación completa realizada para la ejecución de los experimentos. En ella se puede ver la disposición de todos los sistemas involucrados en los experimentos, y que se han descrito en los apartados anteriores.

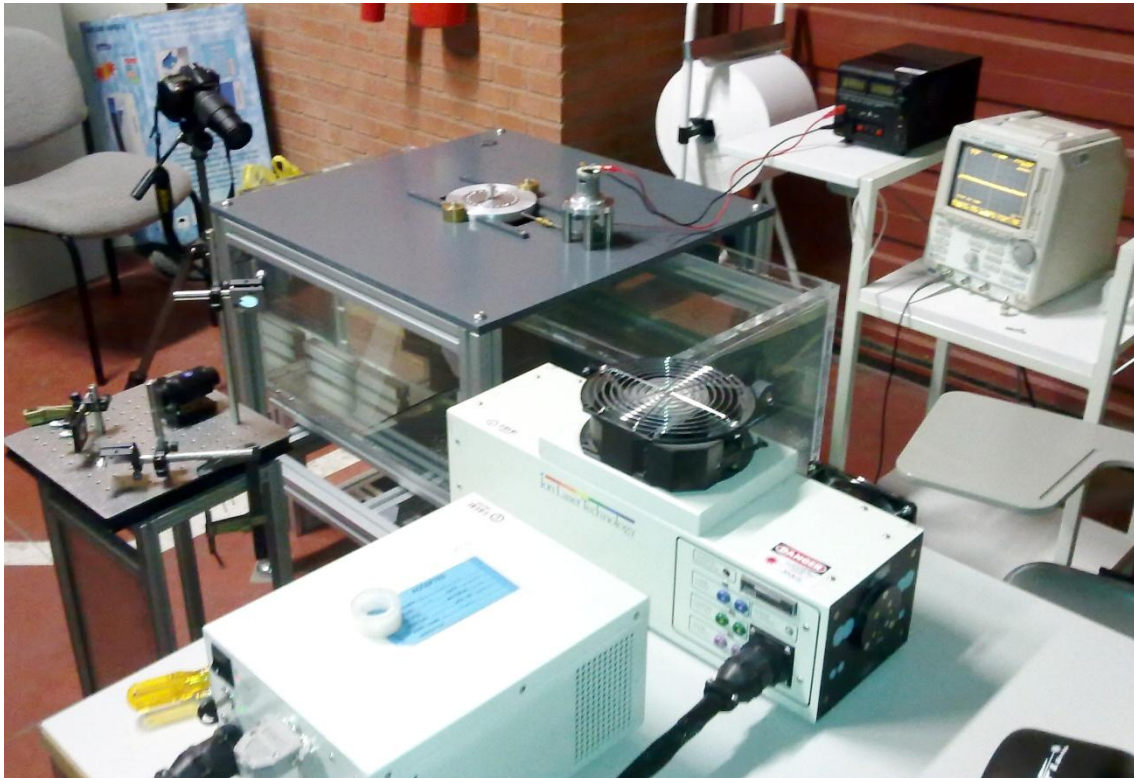


Imagen 23

En primera instancia de la imagen puede verse el sistema laser apuntando hacia el sistema óptico de espejos y lentes. En el centro se encuentra la pecera con la mesa que soporta a los cilindros su sistema de movimiento. A mano derecha se encuentran la fuente de alimentación del motor y el osciloscopio utilizado para medir la velocidad de giro del motor.

3.8 Rangos de funcionamiento del sistema

Se exponen en este apartado los rangos de funcionamiento, de cara a futuros usos del aparato de experimentación. Así, si se desea volver a utilizar, se dispone de este tipo de datos para la planificación de nuevos experimentos.

- **Cilindros**

Se dispone de cilindros de PVC de distintos diámetros, que van desde 15 mm a 40 mm en intervalos de 5 mm. Además, se dispone de 4 placas de metacrilato para dar mayor rigidez a las parejas de cilindros de diámetros de 15 y 20 mm. Hay 4 placas debido a que para cada pareja se dispone de dos placas distintas. Los rangos para las placas son los siguientes:

Placas	Distancia mínima [mm]	Distancia máxima [mm]
Placa 1 (Ø15 mm)	17	28
Placa 2 (Ø15 mm)	28	39
Placa 3 (Ø20 mm)	22	38
Placa 4 (Ø20 mm)	38	50*

Tabla 2

* La placa realmente permite hasta 54 mm de distancia, pero el cuello del aparato porta-cilindros es de Ø 70 mm. Si se colocaran los dos cilindros de Ø 20 mm con 54 mm de distancia entre sí, necesitarían un cuello de Ø 74 mm.

- **Separación entre cilindros**

Las siguientes distancias se han calculado teniendo en cuenta la limitación de Ø 70 mm del cuello del aparato porta-cilindros para el máximo, y dejando 2 mm de distancia entre sus paredes más cercanas:

Pareja de cilindros	Distancia mínima [mm]	Distancia máxima [mm]
Ø 15 mm	17	39
Ø 20 mm	22	50
Ø 25 mm	27	45
Ø 30 mm	32	40
Ø 35 mm	-	-
Ø 40 mm	-	-

Tabla 3

- **Velocidad del motor**

Según su hoja de especificaciones, los rangos de funcionamiento del motor son:

Voltaje	4 v	6 v	9 v	12 v	15 v
rpm máx.	228	500	700	900	1250
Amp. Máx.	5 A				

Tabla 4

Capítulo 4:

Experimentación

4.1 Método de experimentación y calibración de la instalación

Para realizar los experimentos, como ya se ha explicado, se utilizó un plano laser que iluminase las micro partículas esféricas añadidas al agua. De esta forma solo las partículas que se encuentren en dicho plano serán visibles, y gracias a las mismas, podrá visualizarse el flujo generado por los cilindros introducidos en el agua.

Cabe destacar que para una mejor visualización de las partículas, todas las imágenes que se van a mostrar han sido procesadas eliminándose su color verde producido por el láser y posteriormente corrigiéndose su contraste.

En la imagen 24 puede verse una comparación entre la imagen original y la procesada, para poder hacerse una idea de lo que podía verse a simple vista y la mejora que supone el procesado de la imagen. Es una de las primeras fotos de prueba realizada con el sistema detenido y el agua en calma. Además, solamente hay un cilindro montado en el soporte.

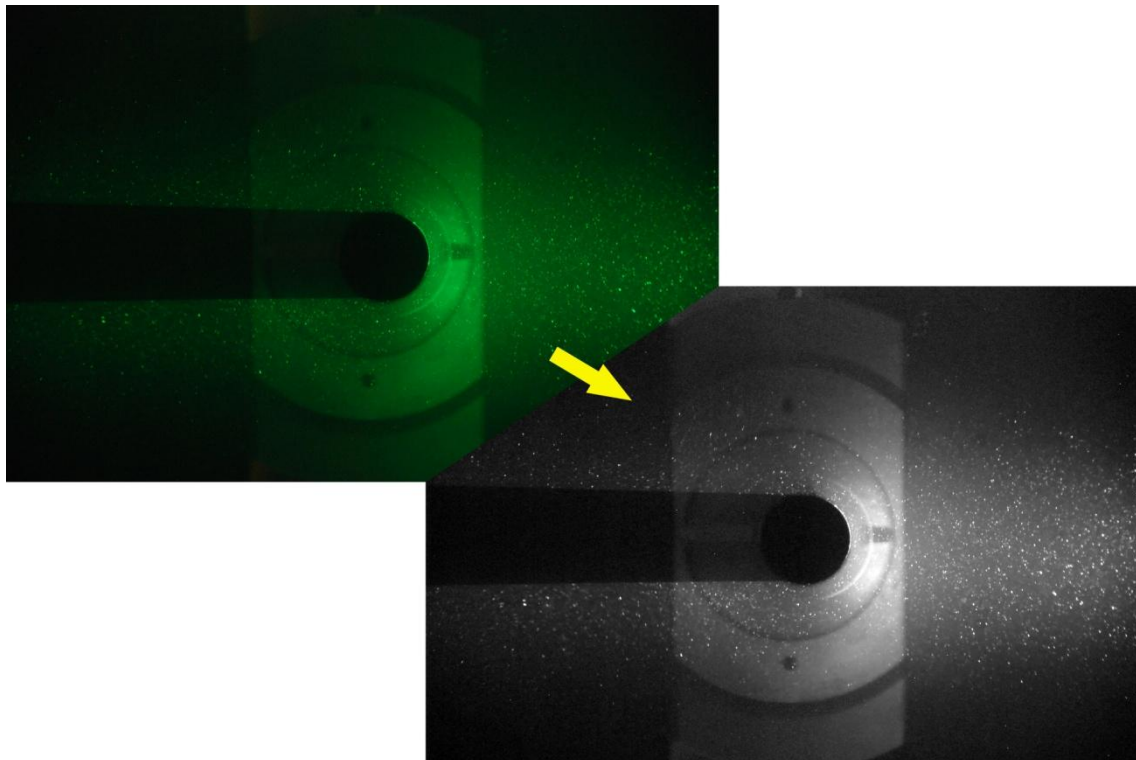


Imagen 24

Como puede observarse, en la imagen procesada las partículas son más fáciles de ver. Sin embargo, tras esta foto se hizo patente que el reflejo del sistema de sujeción de los cilindros debía ser tapado de alguna manera, ya que complica mucho la visibilidad de las partículas en las áreas más cercanas al cilindro (precisamente las más importantes).

Para evitar este problema se pegó cartulina negra a la parte inferior de la mesa, para tapar la mayoría del sistema. Además se pegó cartulina a todas las caras visibles de las piezas de aluminio, y se colocó otra cartulina negra en la superficie del agua para evitar reflejos indeseados en su superficie.

En la siguiente imagen puede verse el resultado de estas mejoras:

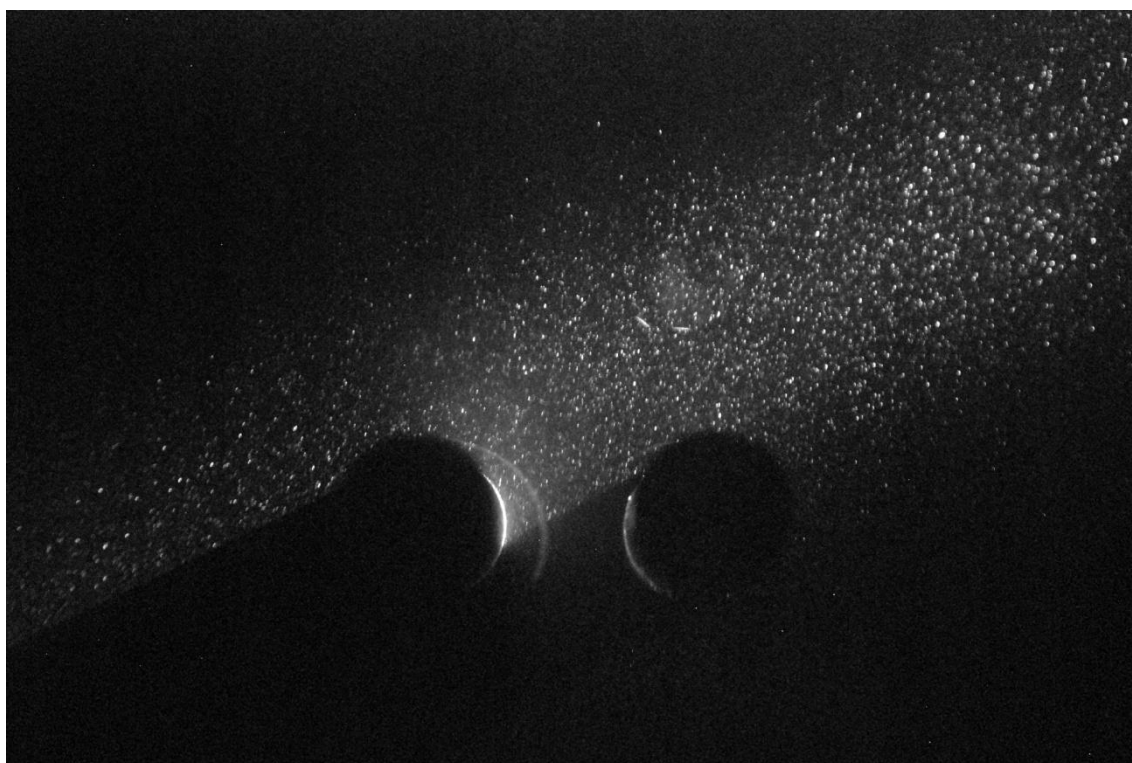


Imagen 25

Aparte de haberse tapado las partes brillantes del aparato porta-cilindros, en este caso se han colocado dos cilindros y se ha girado el láser 30° para poder visualizar mejor los puntos clave del experimento. Hay que tener en cuenta que en todos estos casos el resultado esperado debe ser simétrico respecto al eje horizontal de las imágenes, así que si se observa de esta manera, se ven casi todas las áreas importantes del experimento.

Además, de nuevo se ha realizado la fotografía con los cilindros detenidos, por lo que no se observan flujos en ningún lugar de la imagen.

En la imagen siguiente se muestra lo que se observaba una vez se ponían en movimiento los cilindros. Como puede verse, se aprecia que aparecen flujos en los alrededores de los cilindros. Sin embargo, esos flujos no muestran ningún tipo de *jet*, por lo que se tuvo que pensar alguna forma de poder visualizar los experimentos más fácilmente. La razón de que no se observen jets en la imagen, es porque el plano es demasiado estrecho, como ya se explicará en el capítulo 5.

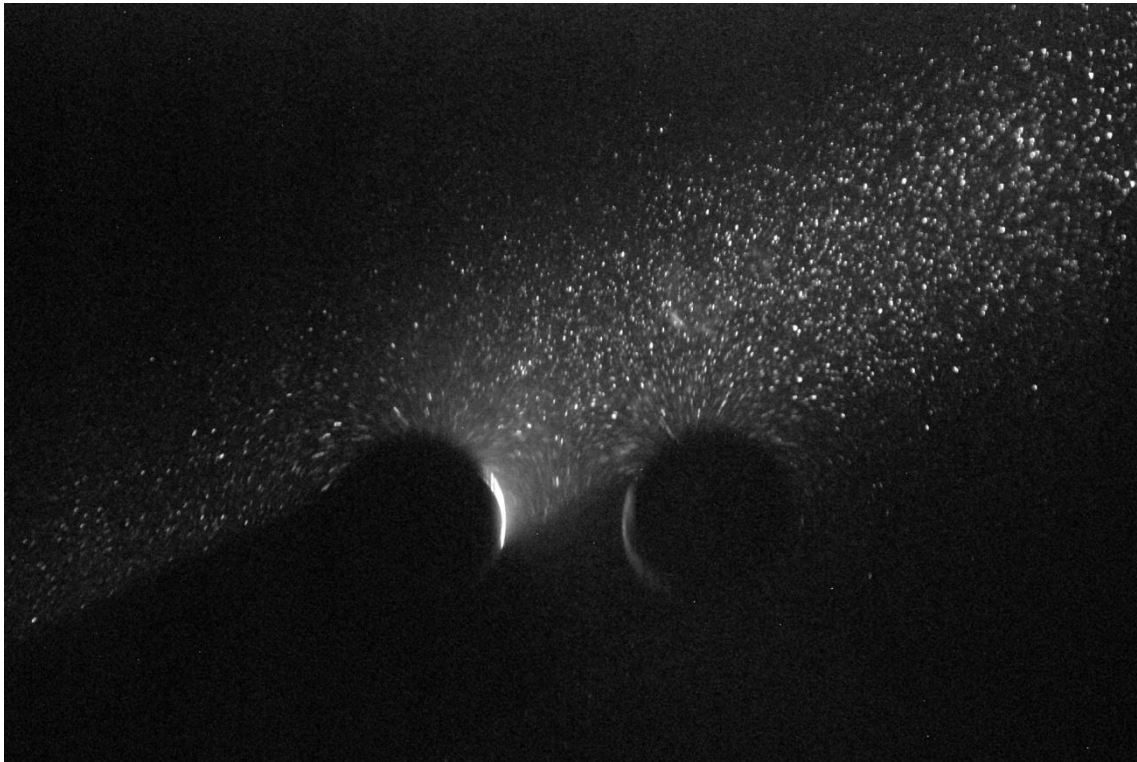


Imagen 26

La solución adoptada fue, mediante una jeringa, inyectar una solución más rica en partículas en los alrededores de los cilindros, ligeramente por encima del plano de luz. A dicha jeringa se le acopló una varilla hueca para poder inyectar la solución cerca del plano de experimentación, modificando el campo fluido lo mínimo posible. Dicha solución se tomó tras comprobar que tras inyectar el fluido introduciendo la jeringa manualmente el flujo tardaba demasiado en estabilizarse, y la solución enriquecida de partículas se disipaba antes de poder hacer buenas fotografías.

Los resultados obtenidos, una vez que el flujo se recuperaba de la distorsión producida por el chorro turbulento de solución rica en partículas, son los que se muestran en los experimentos de las páginas siguientes.

4.2 Primer experimento

Un solo cilindro

Antes de realizar los experimentos de *steady streaming* con dos cilindros, se hizo un experimento con un solo cilindro. La decisión de realizar este experimento se debe al hecho de que es el caso más sencillo de observar ya que el *jet* debe ser fácilmente observable. De esta manera, se puede comprobar que el funcionamiento del sistema es correcto, y así dar validez a los resultados posteriores realizados con dos cilindros.

En la siguiente imagen se puede verse muy claramente el jet producido por el cilindro, que sale a cero grados respecto al eje de movimiento, como era de esperar. Se ha resaltado la silueta del cilindro para una mayor facilidad a la hora de identificar el mismo.

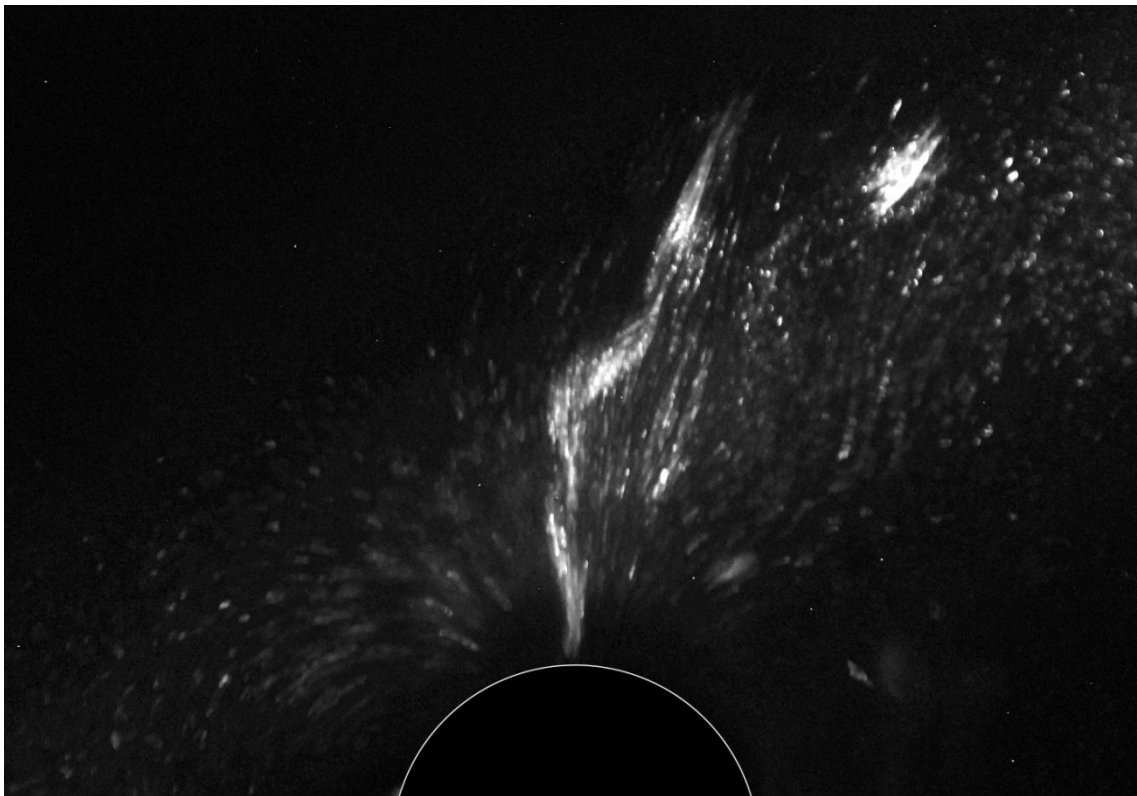


Imagen 27

Este resultado, como se ha dicho, es muy importante ya que demuestra que el sistema funciona correctamente y que se puede dar por hecho que el movimiento del cilindro es correcto.

En este caso no se dan los datos del diámetro de los cilindros, así como de la velocidad de giro del motor (o el periodo del movimiento armónico) ya que al ser un experimento de prueba, no son datos determinantes.

4.3 Segundo experimento

Dos cilindros colocados a 90° con el eje de movimiento, distancia entre cilindros igual al radio

En este segundo experimento se colocaron los dos cilindros de \varnothing 25 mm a 90° (o lo que es lo mismo, $\Phi = \pi/2$), con un radio de giro $d = 1$ mm. Esta combinación resulta:

$$\varepsilon = \frac{0.001}{0.0125} = 0.08$$

Se decidió tomar este valor menor de lo esperado ya que en los experimentos anteriores se pudo comprobar que la visualización era más fácil de obtener con el radio de giro de 1 mm en vez de otro más grande.

La distancia entre los dos cilindros era del valor del radio de los cilindros, y el periodo de movimiento se eligió a la velocidad aparentemente adecuada teniendo en cuenta los resultados anteriores.

Con esta combinación se pudo tomar esta interesante instantánea, en la que de nuevo están resaltados los cilindros para su mejor identificación:

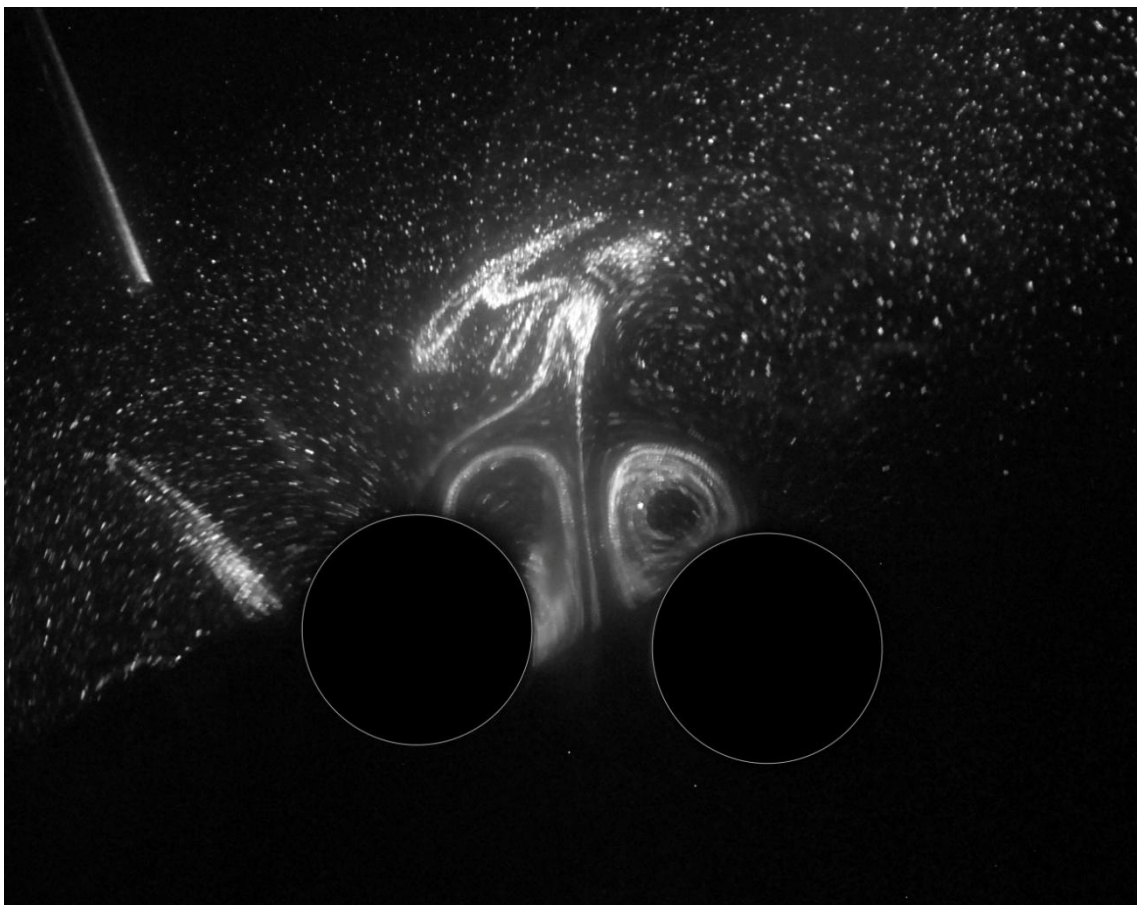


Imagen 28

Como puede verse, podemos identificar muy claramente dos vórtices que se forman entre los cilindros, que se puede apreciar que son estables (no se desprenden) si se ve la secuencia entera de fotografías. Además son casi simétricos.

Como se resalta en la imagen siguiente, podemos comprobar cómo aparecen jets en ambos cilindros, con un cierto ángulo α que no es de cero grados como en el caso de un único cilindro, sino que están ligeramente desplazados uno hacia el otro. Esto es lo que aparentemente forma los dos vórtices. Además, aunque parece que se inclinan desde el principio hacia el centro, parece que en momento de ser eyectados lo hacen hacia fuera de la imagen, pero se ven atrapados por el vórtice rápidamente (ese detalle es mejor verlo en la imagen no esquematizada).

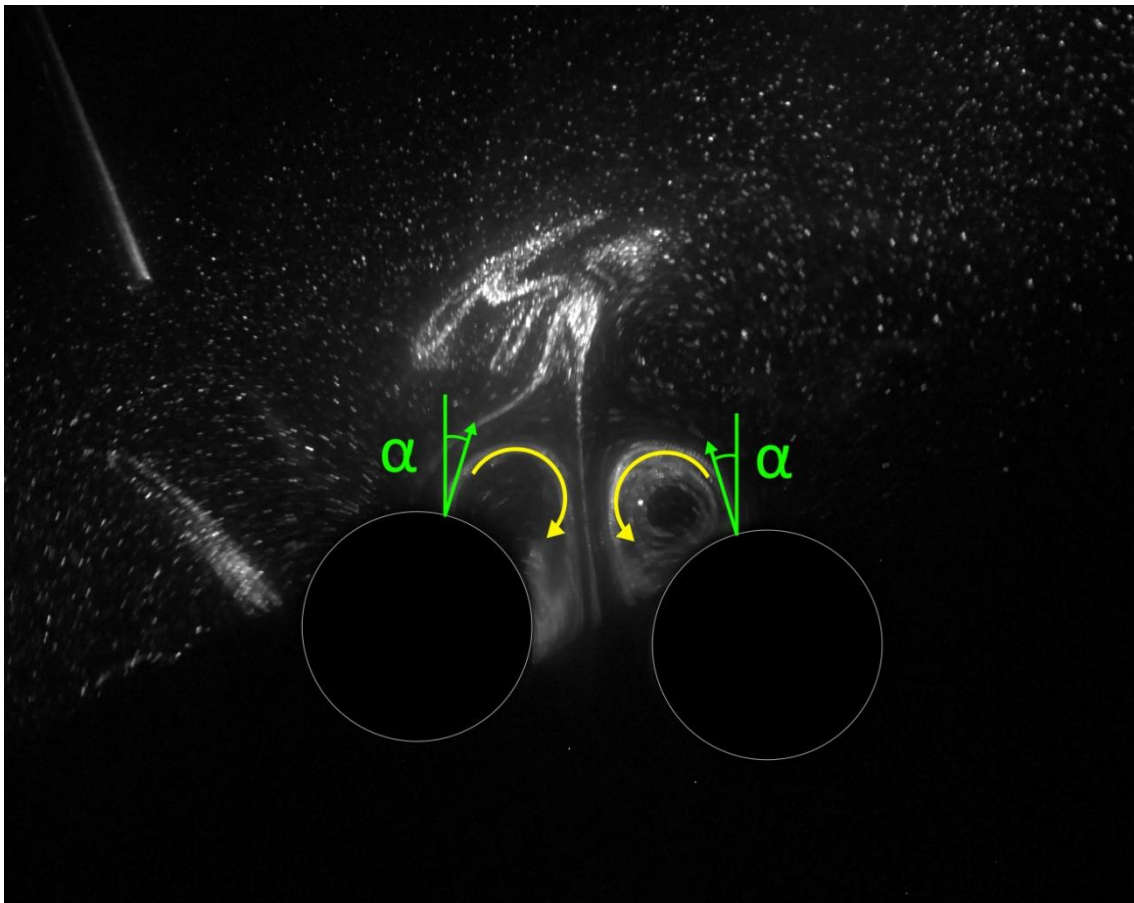


Imagen 29

Los efectos descritos en el párrafo anterior (y observados en la imagen) demuestran que los resultados esperados, a priori son correctos, si es que realmente salen eyectados hacia fuera de la imagen como sugiere la teoría (imagen 1-e). Esto debería ser estudiado en posteriores estudios.

4.4 Tercer experimento

Dos cilindros colocados a 60° con el eje de movimiento, distancia entre cilindros igual al radio

En este experimento nos encontramos los mismos cilindros que en el caso anterior, con la única diferencia en el ángulo Φ , que en lugar de ser de 90° ahora es de 60° .

La siguiente imagen muestra el mejor resultado obtenido en este caso:

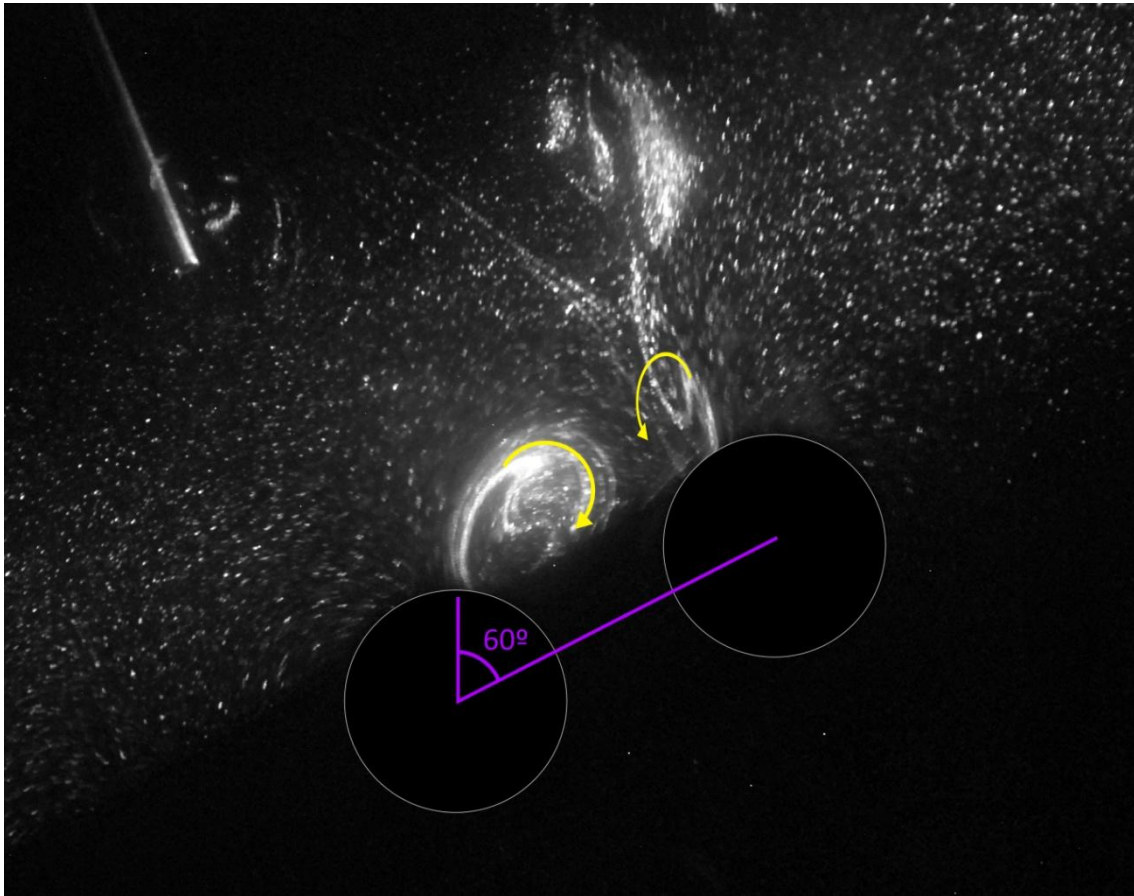


Imagen 30

En este caso los vórtices no están tan claramente definidos. Sin embargo también su ángulo parece ser parecido al estudiado en la teoría (imagen 1-d)

Para una mayor profundización en este caso, serían necesarios nuevos experimentos, que desgraciadamente no han podido ser hechos por falta de tiempo.

4.5 Cuarto experimento

Dos cilindros colocados a 0° con el eje de movimiento, distancia entre cilindros igual al radio

También en este caso tenemos los mismos cilindros con las mismas características que en los casos anteriores, pero modificando el ángulo Φ , que en lugar de ser de 90° ahora es de 0° .

La mejor instantánea que pudo tomarse en este caso fue la siguiente:

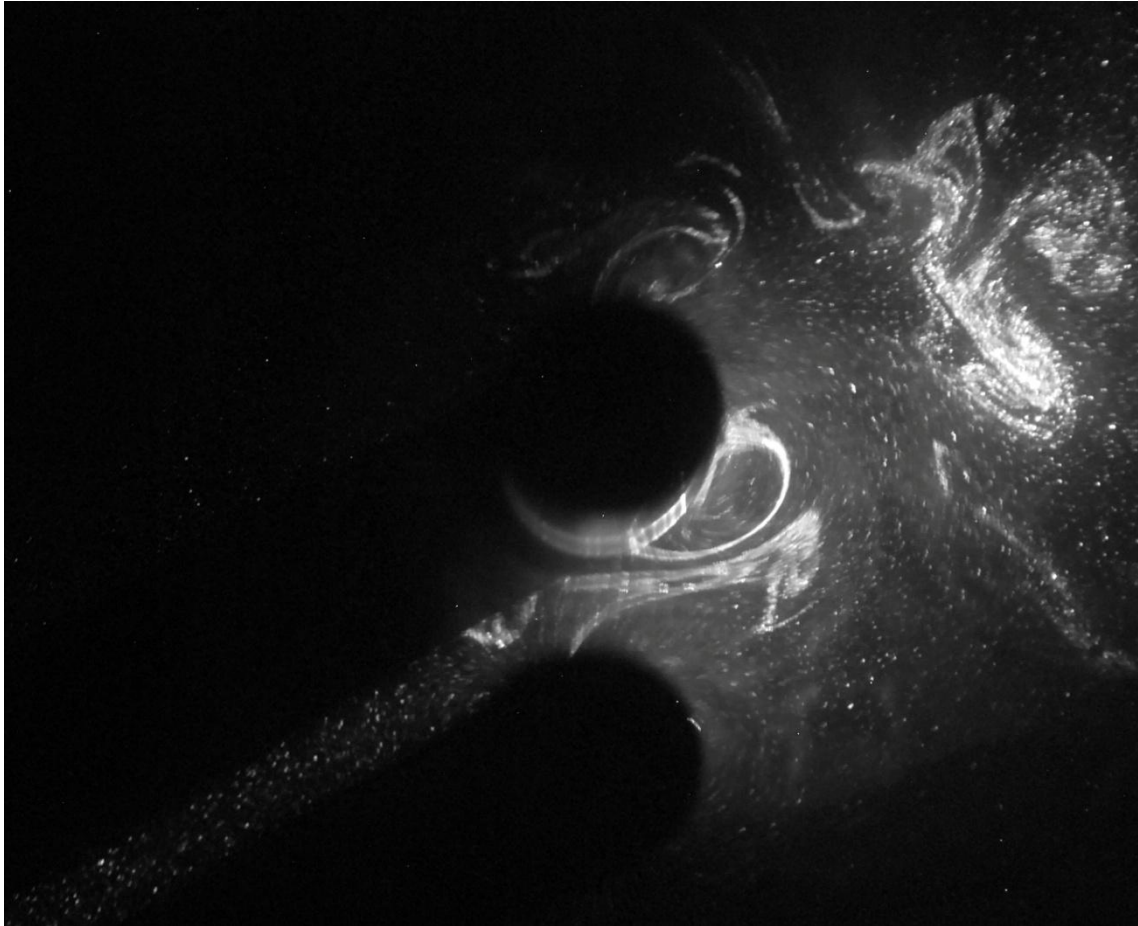


Imagen 31

Al igual que en el caso anterior, la imagen no está tan clara como en el primer y segundo caso por la elevada complejidad del suceso. Sin embargo, también en ella se pueden encontrar indicios de que la teoría prevista para este caso es correcta (imagen 1-a), ya que se puede apreciar el jet que sale entre los cilindros a 90° con el movimiento (recordemos que siempre es vertical en todas las fotografías).

También puede apreciarse muy débilmente el jet saliente del cilindro superior, por el extremo opuesto al otro cilindro.

4.6 Quinto experimento

Dos cilindros colocados a 90° con el eje de movimiento, distancia entre cilindros mayor al radio

Como en todos los casos, tenemos colocados los cilindros de \varnothing 25 mm con las mismos parámetros que en el segundo experimento, pero con la diferencia de la distancia entre centros, que en este caso es mayor que el radio.

Los resultados esperados teniendo en cuenta la teoría y los resultados del segundo experimento, son que los jets se vean poco afectados por la influencia del otro cilindro, a diferencia del caso mencionado, en el que se inclinan entre sí formando los vórtices.

En un primer momento se pudo apreciar esta situación:

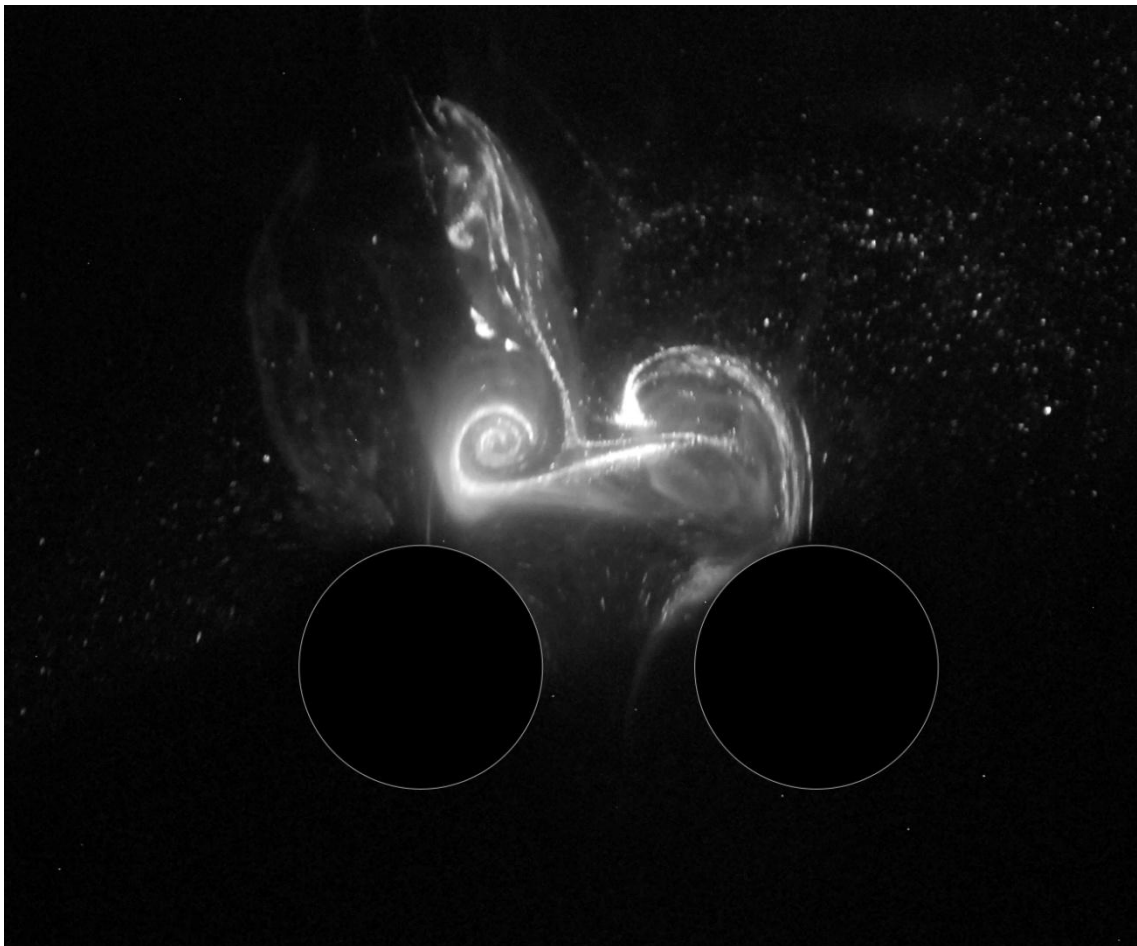


Imagen 32

Como puede observarse en la imagen anterior, se forman vórtices como los del segundo caso. Sin embargo, estos vórtices están generados por la distorsión generada por el chorro de solución rica en partículas, que como puede deducirse de la imagen, procede del área superior izquierda de la imagen.

Sin embargo, si vemos la imagen del mismo experimento, pero tomada instantes después de la primera, vemos lo siguiente:

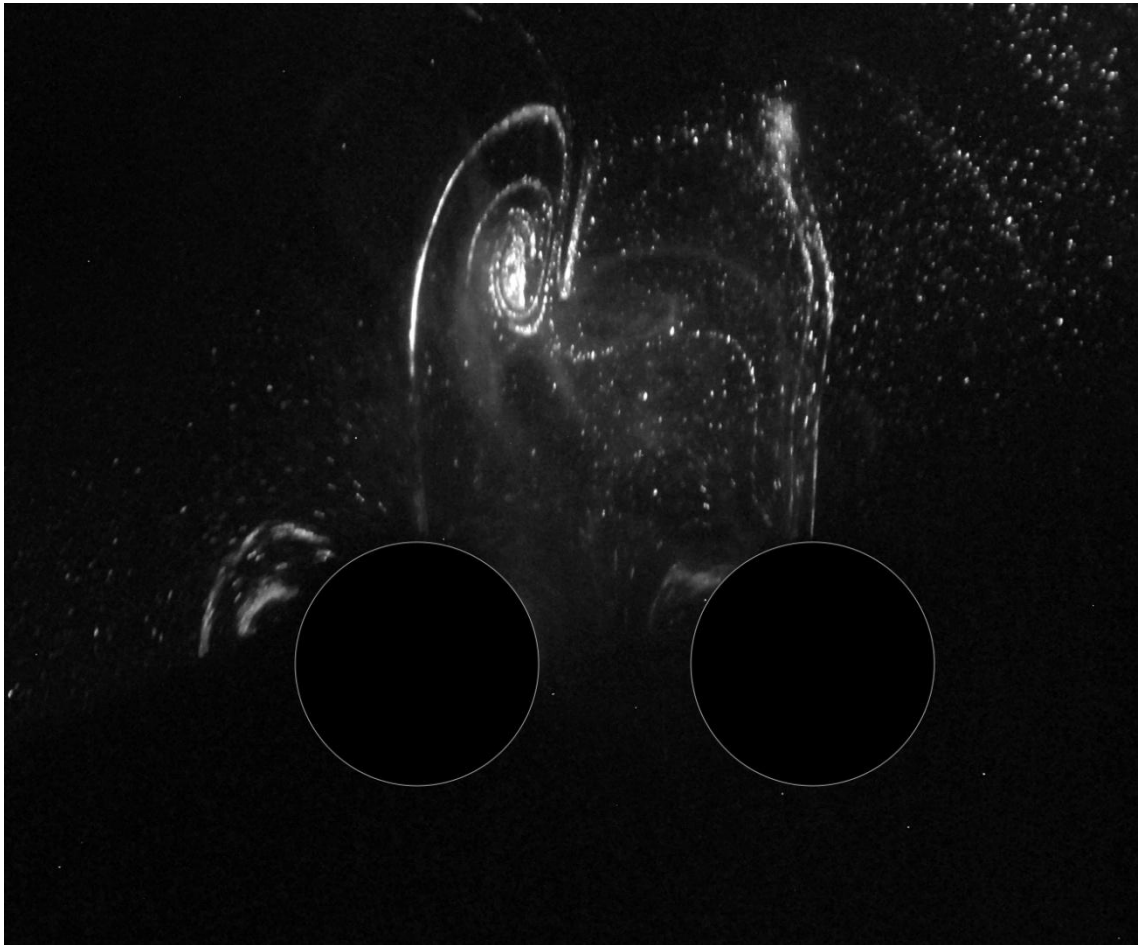


Imagen 33

Como se puede ver, el fluido de las inmediaciones de los cilindros se recupera de la perturbación retomando el comportamiento de los jets, que pueden observarse con gran calidad en la imagen. El vórtice que aún puede verse es el vórtice de la imagen anterior que se ha desprendido hacia la parte superior de la imagen por efecto del jet del cilindro izquierdo.

Este comportamiento demuestra que cuando se alejan los cilindros lo suficiente, el efecto que ejerce el uno sobre el otro disminuye hasta comportarse casi como un solo cilindro. Por esa razón no aparecen los vórtices estacionarios que veíamos en el experimento 2.

4.7 Sexto experimento

Dos cilindros colocados a 90° con el eje de movimiento, distancia entre cilindros menor al radio

En este caso se estudia lo que sucede en el caso anterior, pero con los cilindros a menor distancia de separación que el radio. En la siguiente imagen podemos ver la fotografía tomada una vez puesto en funcionamiento el experimento:

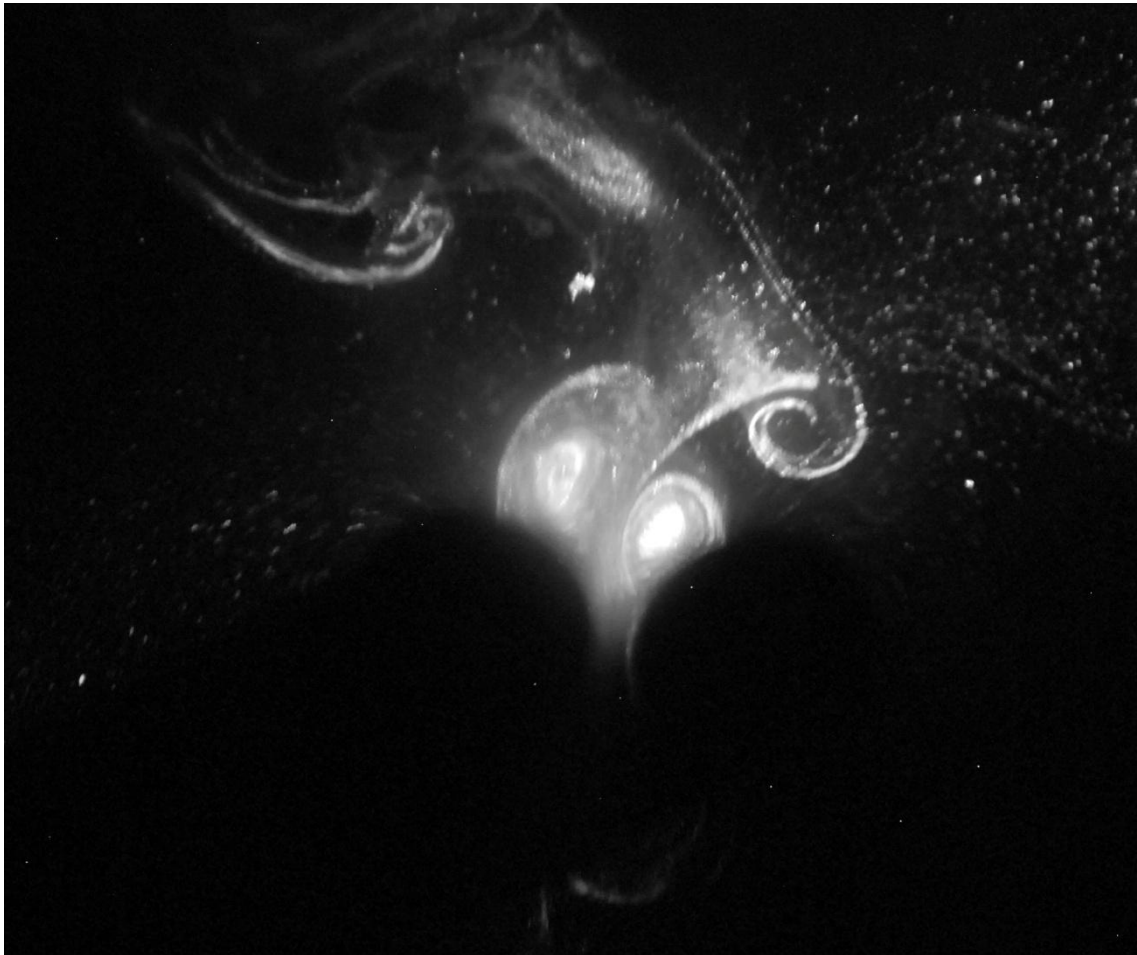


Imagen 34

Como puede verse, aparecen de nuevo los vórtices anclados a los cilindros. Sin embargo, en este caso debería apreciarse que su salida es hacia fuera más claramente que en el caso 2, cosa que no ocurre. Además, en este caso tampoco son simétricos como debería suceder. En este caso vemos como el vórtice izquierdo es de mayor tamaño que el derecho.

Ocurre además un hecho interesante si vemos una imagen tomada instantes después de la primera fotografía:

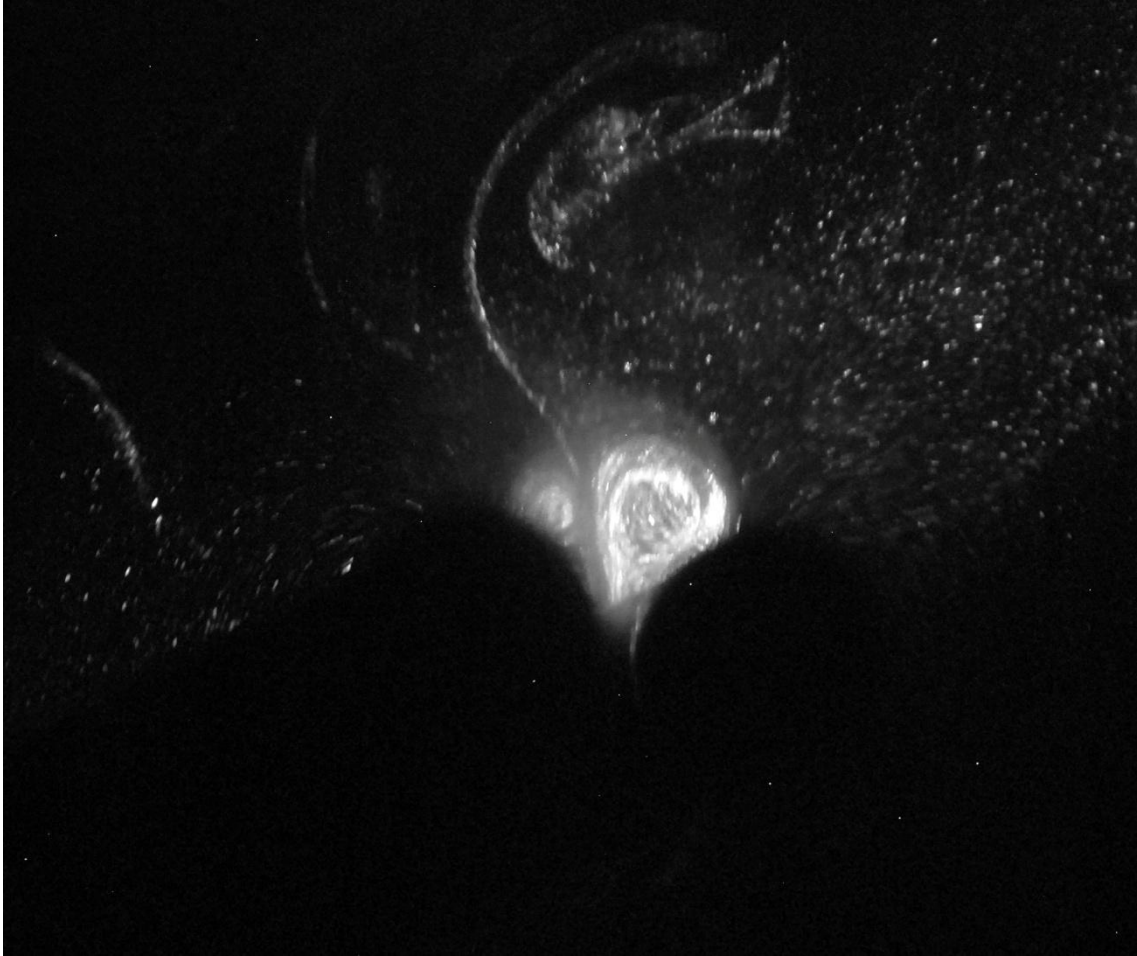


Imagen 35

Como puede observarse, ahora el vórtice derecho es de mayor tamaño que el izquierdo, aunque parece que la eyección ocurre con un ángulo más oblicuo hacia fuera de la pareja de cilindros. Este efecto no parecía suceder en la anterior imagen.

El hecho de que los vórtices cambien de tamaño alternativamente sugiere un comportamiento no estacionario que habría que investigar más a fondo. Por ello, se realizó el mismo experimento varias veces más, observando que en otras ocasiones lo que ocurre es que en un cilindro aparece un jet igual a lo predicho en la teoría. Como puede verse, el cilindro derecho produce un jet expulsado hacia la parte derecha de la imagen de forma oblicua, de forma muy parecida a lo predicho por la teoría.

Sin embargo, el otro cilindro no produce el mismo comportamiento, ya que lo que aparece es un vórtice estacionario y colocado casi entre los dos cilindros. Habría que investigar si esto está provocado por algún problema en la instalación o realmente es lo que cabe esperar que ocurra.

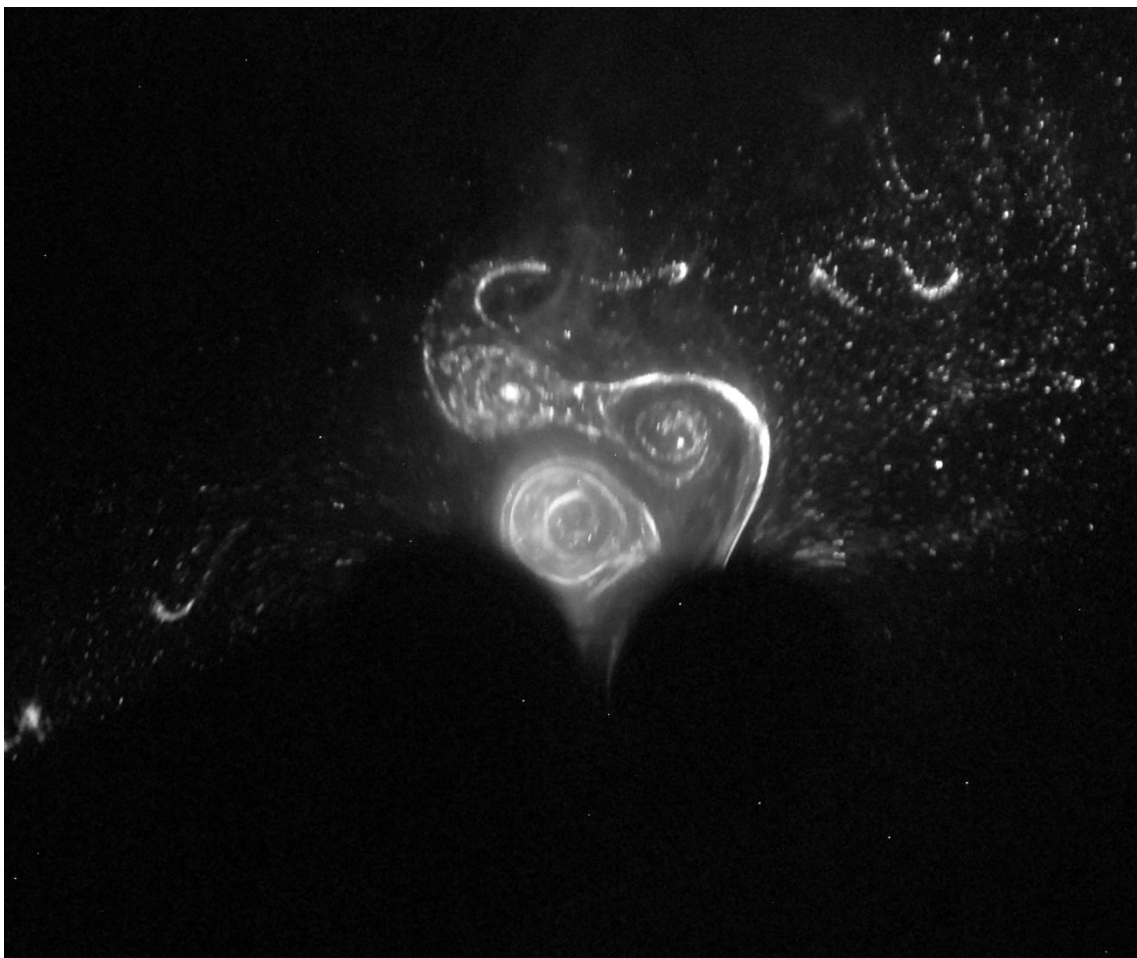


Imagen 36

Con este caso finaliza el capítulo dedicado a los experimentos.

Capítulo 5:

Conclusiones y posibles mejoras

5.1 Conclusiones de los experimentos

Tal y como el lector se habrá dado cuenta, a la hora de hacer los experimentos no se han dado datos exactos de periodo (o frecuencia de giro) ni se han dado datos de velocidades de flujo u otros datos que podrían extraerse de los experimentos.

La razón es que el objetivo de los experimentos no era llegar a tanto detalle, sino simplemente confirmar a primera vista alguna de las conclusiones a las que se ha llegado con la teoría, hecho que en principio parece que se ha cumplido.

Si en un futuro se hiciesen más experimentos, aparte de realizar las mejoras propuestas en el siguiente apartado, habría que tener una mayor disciplina a la hora de definir perfectamente los parámetros del caso, para realizar exactamente los mismos experimentos que los analizados en la teoría.

Uno de los posibles métodos sería la utilización de un software avanzado que pudiese analizar los trazos realizados por las partículas para así obtener mediciones precisas de velocidades, por ejemplo.

5.2 Posibles mejoras futuras en la instalación

De cara a futuros experimentos más precisos, hay una gran cantidad de factores que deberían mejorarse sustancialmente. Dichos factores son los siguientes:

- **Mejora del plano láser:** El plano láser generado era un plano muy estrecho en el plano vertical. Esto en principio no parece un problema, pero al hacer los experimentos quedó patente que realmente sí es algo importante.

Las partículas, como ya se ha explicado, se hacían visibles al incidir sobre ellas la luz del plano láser. En principio esas partículas, al moverse, si se hace una fotografía con un tiempo de exposición elevado deberían dejar tras de sí un trazo de luz que representaría el campo de velocidades del fluido.

Sin embargo, al ser un plano tan estrecho, lo que ocurría es que esas partículas no se movían en el plano, sino que tenían una pequeña velocidad vertical, por lo que nada más entrar en el plano, lo abandonaban. En las fotos por tanto se seguían viendo las partículas como puntos pese a tener un tiempo de exposición elevado.

Por ello, para futuros experimentos debería utilizarse un dispositivo que genere un plano más ancho, como por ejemplo de 5 mm de espesor. Así, las partículas tendrían tiempo suficiente para dejar su trazo visible en las fotografías.

Este problema provocó que se tuviera que inyectar un chorro rico en partículas para visualizar los flujos en lugar de poder verlos a simple vista.

Por otra parte, el plano también era demasiado estrecho en el plano horizontal, por lo que no se podía visualizar claramente gran parte del campo fluido. Este, sin embargo, es un problema menos grave que el anterior.

Por otra parte, y para terminar con el láser, sería muy conveniente conseguir generar dos planos superpuestos, pero proviniendo de dos lugares diferentes, preferiblemente a 90° entre sí. De esta forma se evitaría la aparición de sombras producidas por los cilindros.

- **Mejora del láser:** Para los experimentos realizados, la potencia del láser era más que suficiente. Sin embargo, si se quiere mejorar el tamaño del plano láser como se ha descrito en el plano anterior, habría que utilizar un rayo láser más potente que pudiera contrarrestar la pérdida de definición por hacer el plano de mayor tamaño.

En este apartado también podría incluirse la mejora mencionada de los dos planos. Si no existiese un láser capaz de generar dos haces distintos, quizás la solución sería instalar dos láseres distintos.

- **Mejora de la instalación:** También hay margen de mejora en la instalación. Si se deseara utilizar los dos pares de cilindros más gruesos, no se podría. Como se puede ver en la tabla de rangos de separación entre cilindros, no hay datos para los pares de 35 y 40 mm. Esto es debido a que la instalación no se pensó para cilindros de tanto grosor.

Sin embargo, el problema tendría una solución relativamente fácil. Bastaría con fabricar una pieza que se pudiera acoplar en la parte inferior del disco porta-cilindros, cuyo extremo terminase por debajo del plano inferior del carro. Así no existiría limitación inferior, aunque sí exterior. Para solucionar esto último, podrían hacerse ranuras más grandes a esta pieza extra.

- **Pantalla con la velocidad:** Otra mejora que podría implementarse es la sustitución del osciloscopio para medir la velocidad del motor, por un circuito que transformase la señal a otra que una pequeña pantalla digital mostrase directamente en rpm. Así se evitaría el engorroso proceso de medir la velocidad con el osciloscopio y la instalación sería más barata y sencilla. Por ejemplo:



Imagen 37

Capítulo 6:

Bibliografía

Para la realización del presente proyecto, como se ha dicho innumerables veces, parte del estudio llevado a cabo por Wilfried Coenen y Norman Riley, llamado:

- W. Coenen and N. Riley - *Oscillatory flow about a cylinder pair (2009)* - Q. Jl Mech. Appl. Math, Vol. 62. No. 1 © The author 2009. Published by Oxford University Press

Otros trabajos que se han tenido en cuenta a la hora de realizar el proyecto son:

- Charlotte W. Kotas · Minami Yoda · Peter H. Rogers - *Visualization of steady streaming near oscillating spheroids (2006)* - Exp Fluids (2007) 42:111–121 DOI 10.1007/s00348-006-0224-8
- C. W. Kotas, M. Yoda, and P. H. Rogers - *Visualizations of steady streaming at moderate Reynolds numbers (2006)* - DOI: 10.1063/1.2335902
- J. Holtmark, I. Johnsen, T. Sikheland and S. Skavlem - *Boundary Layer Flow Near a Cylindrical Obstacle in an Oscillating, incompressible Fluid (1954)* - The journal of the acoustical society of America Volume 26. Number 1, January, 1954

Capítulo 7:

Anexos

Los siguientes anexos son los planos de las diferentes piezas que componen el sistema de sujeción de los cilindros y del sistema de soporte del motor.

Anexo 1: Plano de la pieza denominada “Carrito”

Anexo 2: Plano de la pieza denominada “Sujeta Carrito”

Anexo 3: Plano de la pieza denominada “Soporte Roscado”

Anexo 4: Plano de la pieza denominada “Portamotor”

Anexo 5: Plano de la pieza denominada “Portacilindros”

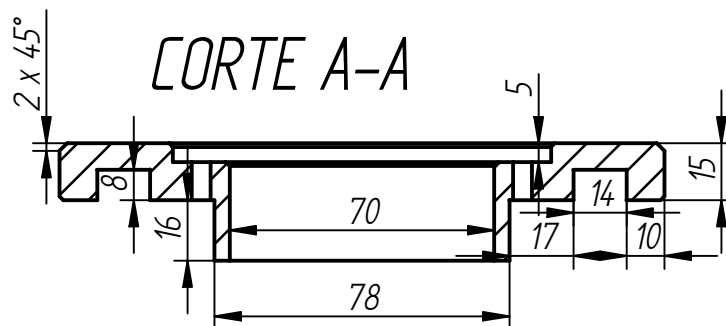
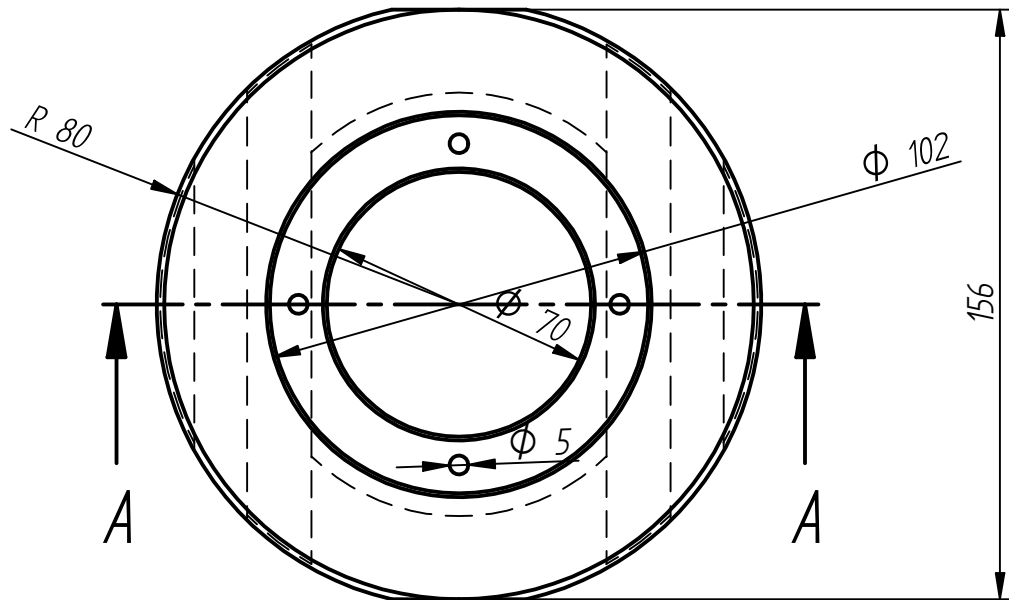
Anexo 6: Plano de la pieza denominada “Excéntrica”

Anexo 7: Plano de la pieza denominada “Columna”

Anexo 8: Plano de la pieza denominada “SujetaMotor”

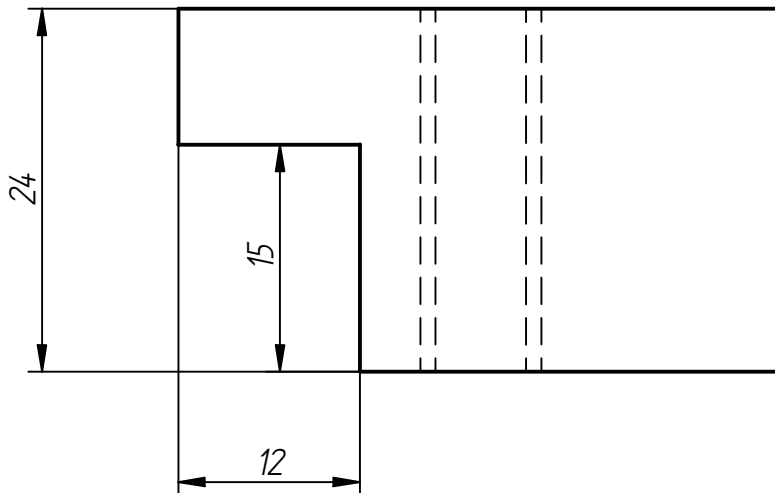
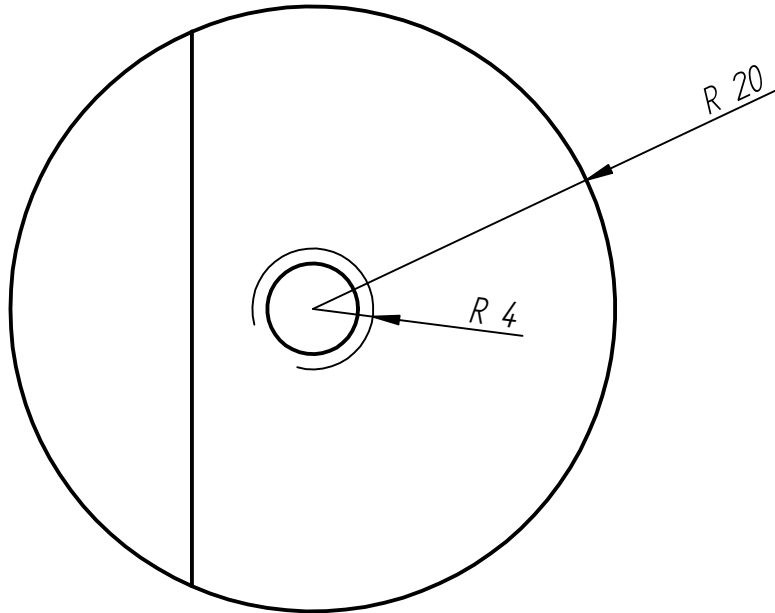
Anexo 9: Plano de las placas de metacrilato para los cilindros esbeltos

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



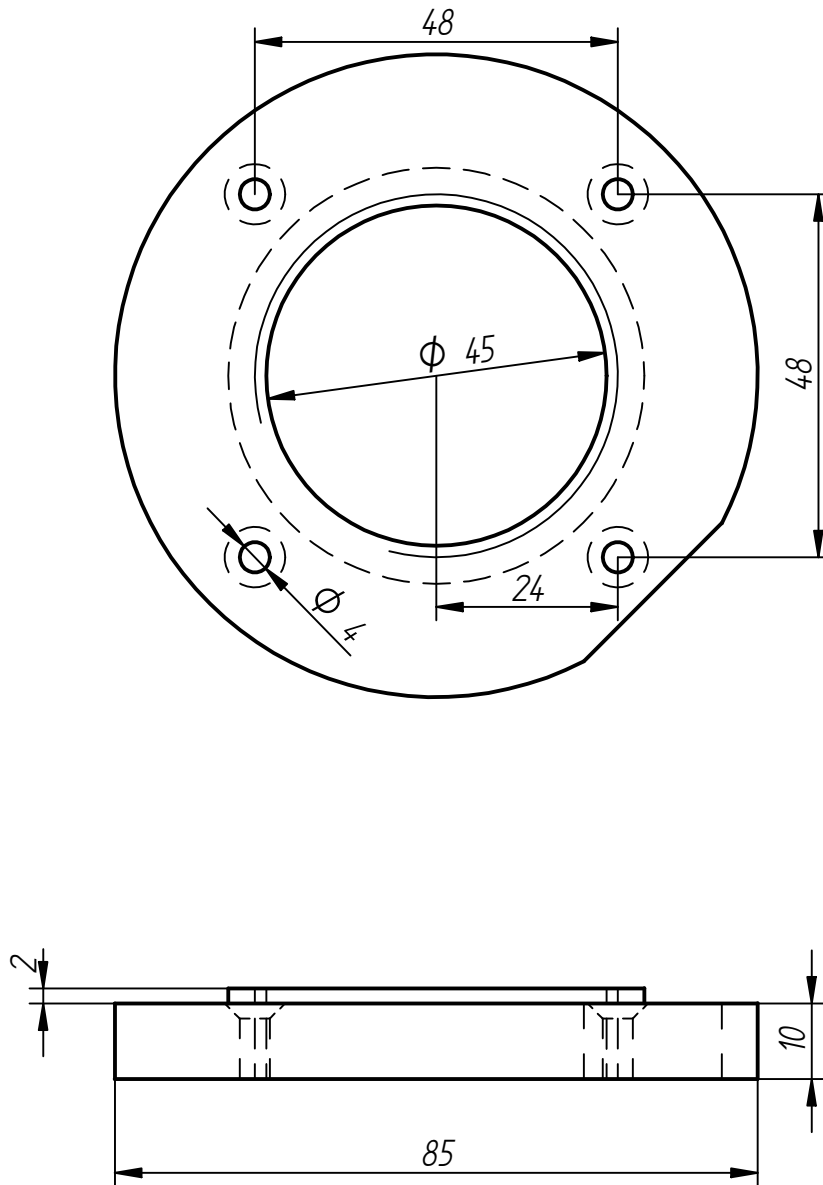
	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	Eduardo	19/07/11		
Comprobado			Título	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano
			Archivo: Carrito.dft	
			Escala 1:2	Peso
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



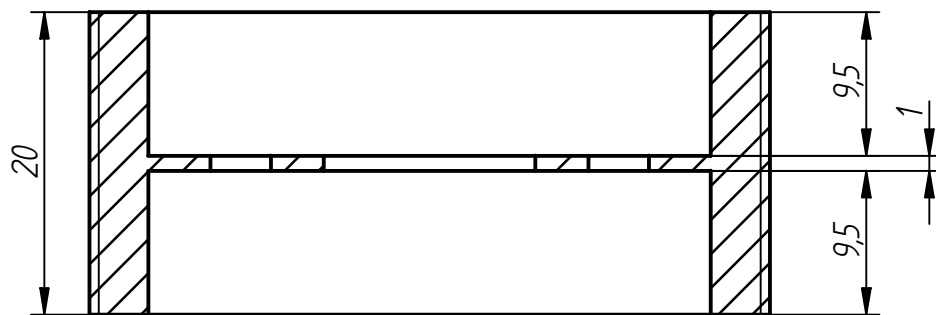
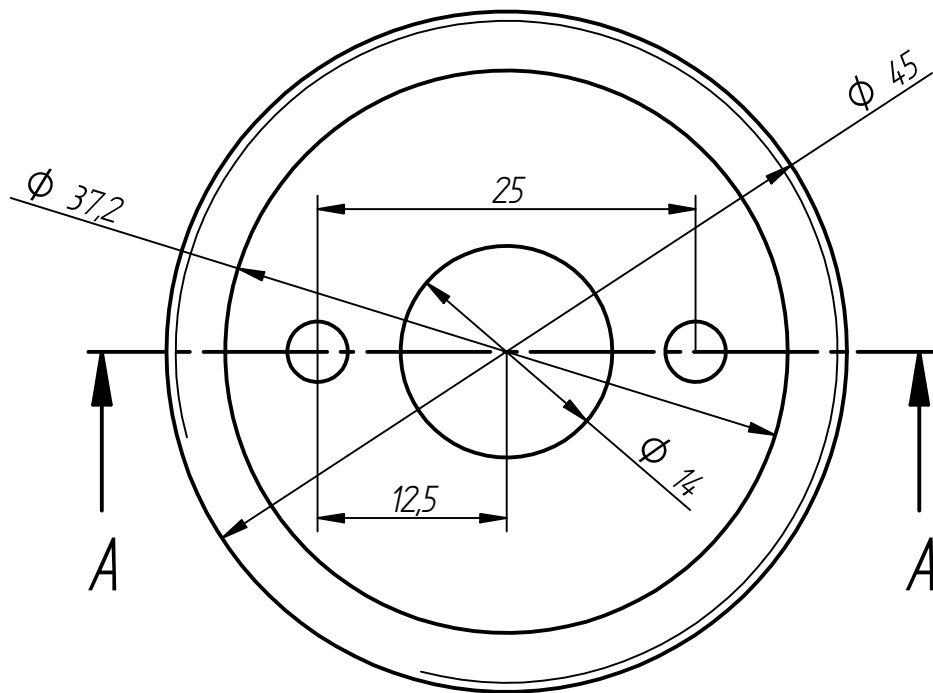
	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	Eduardo	19/07/11		
Comprobado			Título	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano
			Rev	
			Archivo: SujetaCarrito.dft	
			Escala 2:1	Peso
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	L022c304	29/06/11		
Comprobado			Título	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A4	Plano
			Archivo: SoporteRosado.dft	
			Escala 1:1	Peso
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

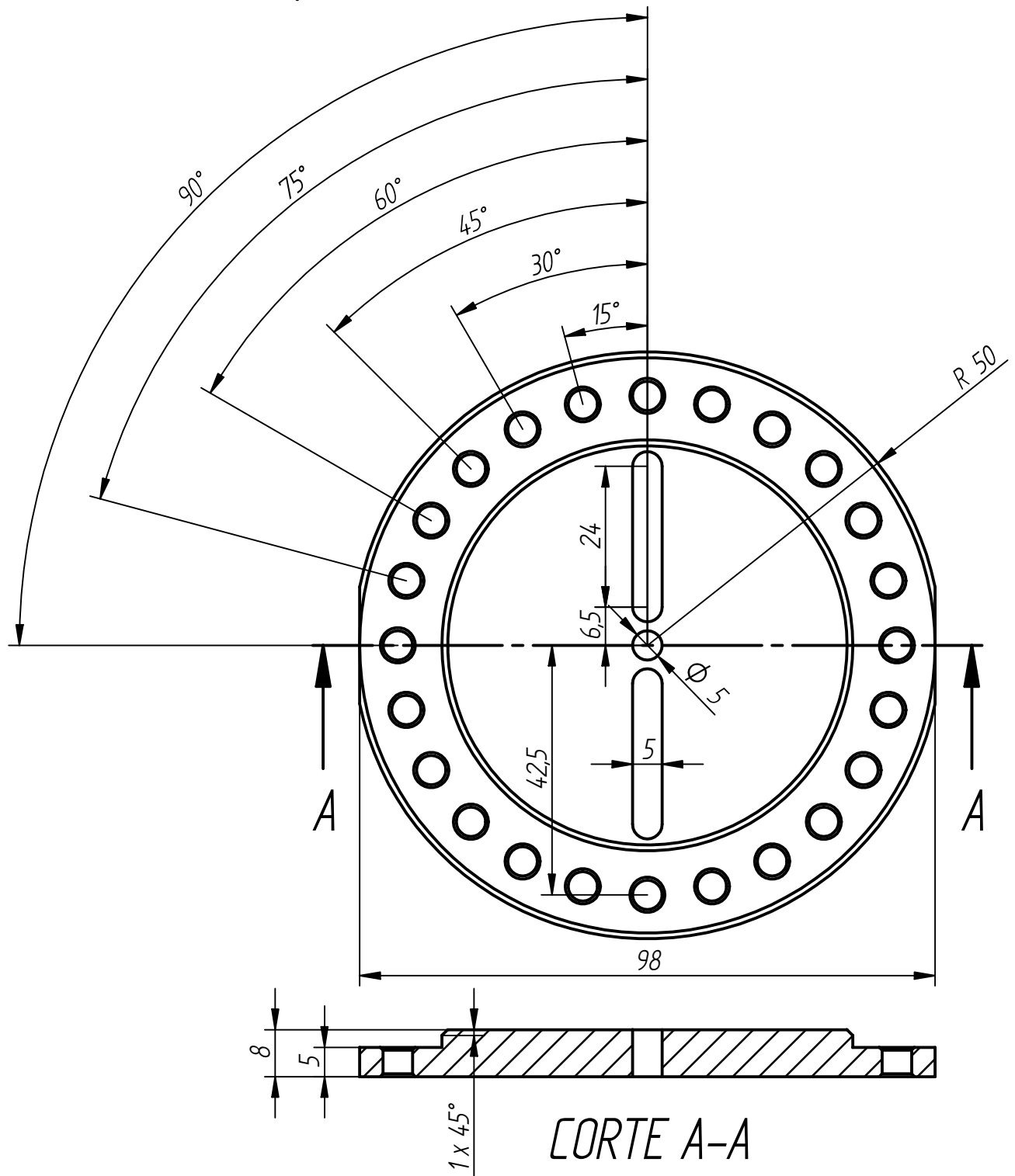


CORTE A-A

Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	L022c304		
Comprobado		Título	
Aprobado 1			
Aprobado 2		A4 Plano Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Portamotor.dft	
		Escala 2:1	Peso Hoja 1 de 1

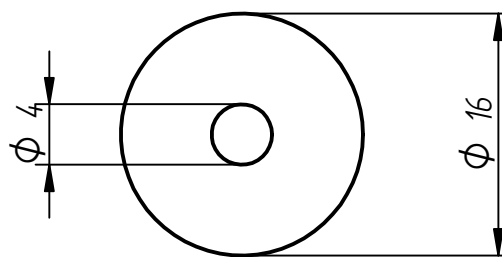
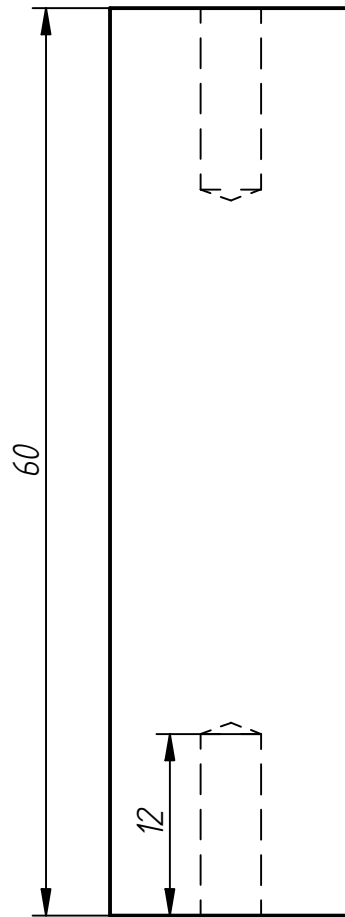
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



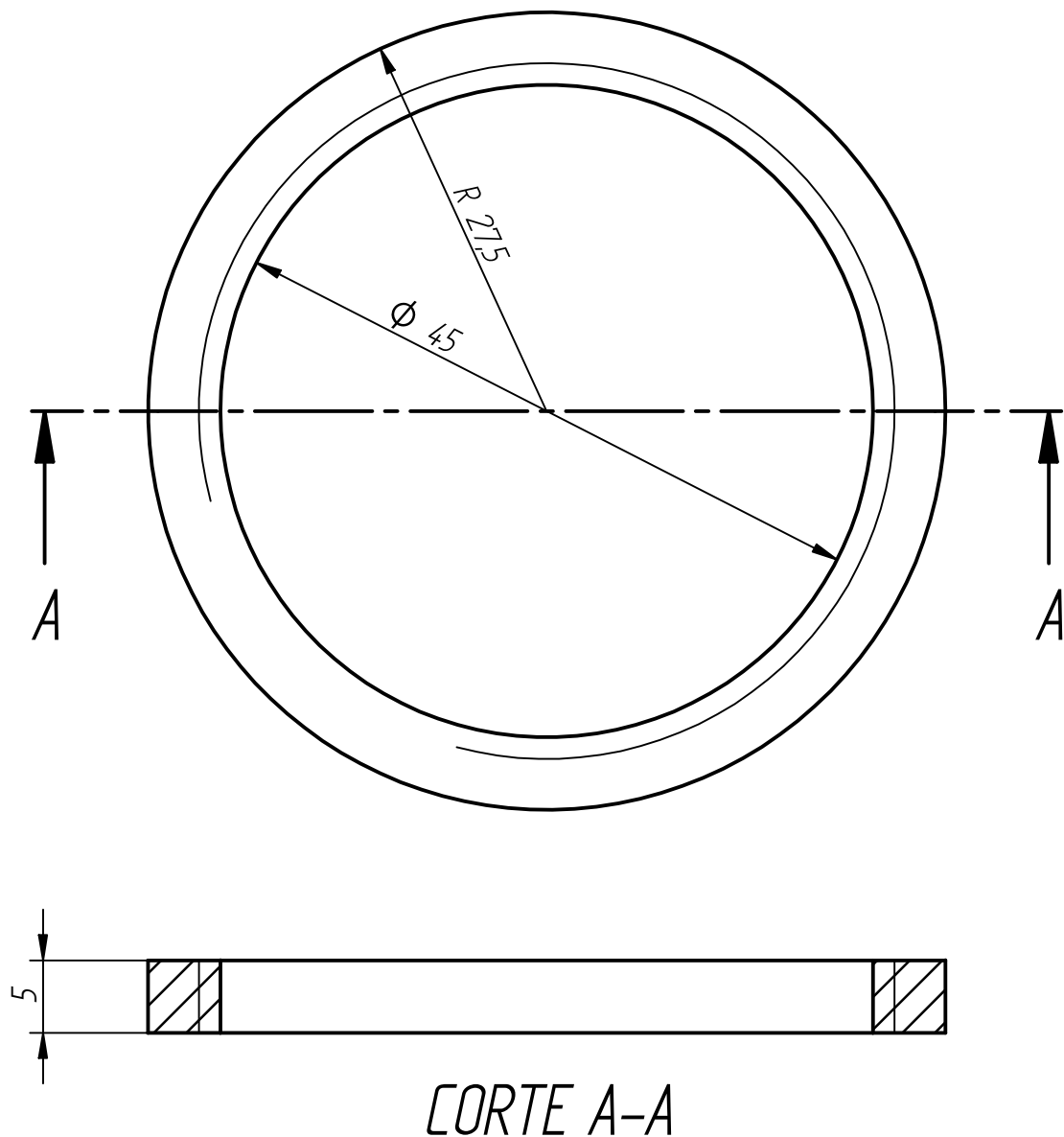
Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	Eduardo		
Comprobado		Título	
Aprobado 1			
Aprobado 2		A4 Plano	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Rev	
		Archivo: Portacilindros2.dft	
Escala 1:1		Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	Eduardo	19/07/11		
Comprobado			Título	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano
			Archivo: Columna.dft	
			Escala 2:1	Peso Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS	
Dibujado	L022c304	29/06/11		
Comprobado			Título	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano
			Archivo: SujetaMotor.dft	
			Escala 2.1	Peso
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

